

河川堤防の変状検知システム実験結果 (光ファイバによる検知)

令和3年3月

日本電気株式会社

目次

I.	システムの概要	3
II.	光ファイバセンシングの原理	4
III.	光ファイバセンシング技術の特徴	6
IV.	現場実装で想定する配置方法	7
V.	実験の計画	9
VI.	実験での実験結果	10
1.	実験内容	10
2.	実験環境	11
2-1.	測定内容	11
2-1-1.	観測装置	11
2-1-2.	測定したデータの種類	11
2-1-3.	測定パラメータ	11
2-2.	測定箇所	12
2-2-1.	越水実験	12
2-2-2.	河岸侵食実験	13
3.	実験結果	14
3-1.	越水実験の実験結果	14
3-1-1.	測定結果	14
3-1-2.	振動強度による実験結果	19
3-1-3.	振動の周波数特性による実験結果	23
3-1-4.	温度による実験結果	27
3-2.	河岸侵食実験の実験結果	29
3-2-1.	測定結果	29
3-2-2.	振動強度による実験結果	37
3-2-3.	周波数特性による実験結果	46
4.	考察	55
4-1.	越水検知の可否	55
4-1-1.	振動強度による検知可否	55
4-1-2.	周波数による検知可否	57
4-1-3.	温度による検知可否	58
4-2.	河岸侵食検知の可否	59
4-2-1.	振動強度による検知可否	59
4-2-2.	周波数による検知可否	60
4-3.	全体を通しての考察	62
VII.	現場実装への課題	63

I. システムの概要

本システムは、①光ファイバセンシング装置および光ファイバケーブル、②AI 分析部および GUI で構成されます。システムの概要を図 I に示します。

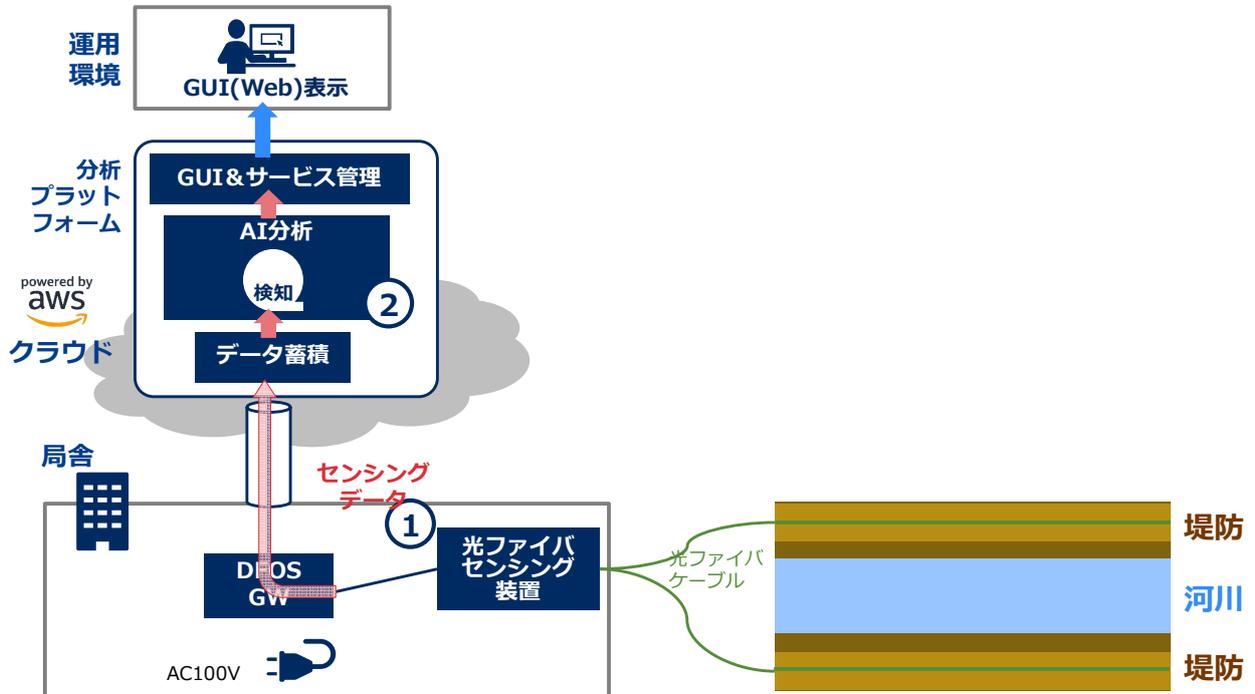


図 I システム概要

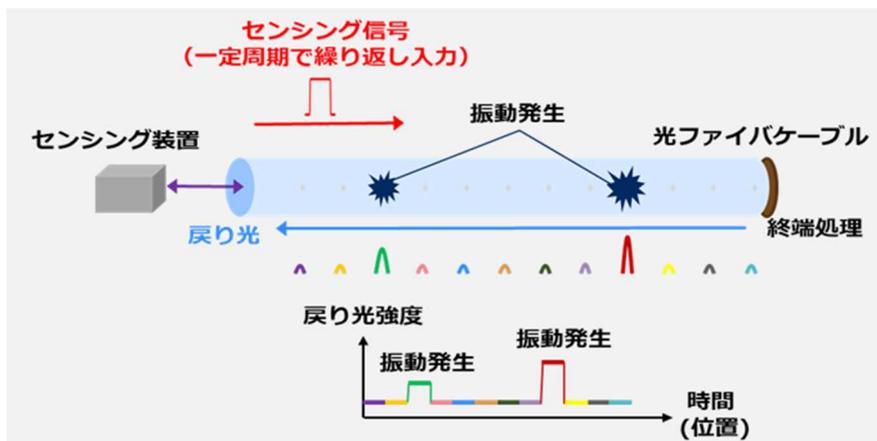
- ① 光ファイバセンシング装置を堤防内に埋設された既設通信用光ファイバケーブルに接続し、堤防の振動および温度をモニタし、センシングデータを AI 分析部に送信します。
- ② AI 分析部ではセンシングデータを蓄積し、分析を行います。この分析により、越水や侵食などによる堤防の変状の発生を検知します。検知した結果をユーザーに対して GUI (Web) で表示します。

II. 光ファイバセンシングの原理

本実験で用いる光ファイバセンサは、分布型ファイバセンシングの原理に基づき振動を検知する。以下に、分布型ファイバセンシングによる振動と温度のモニタについて説明する。

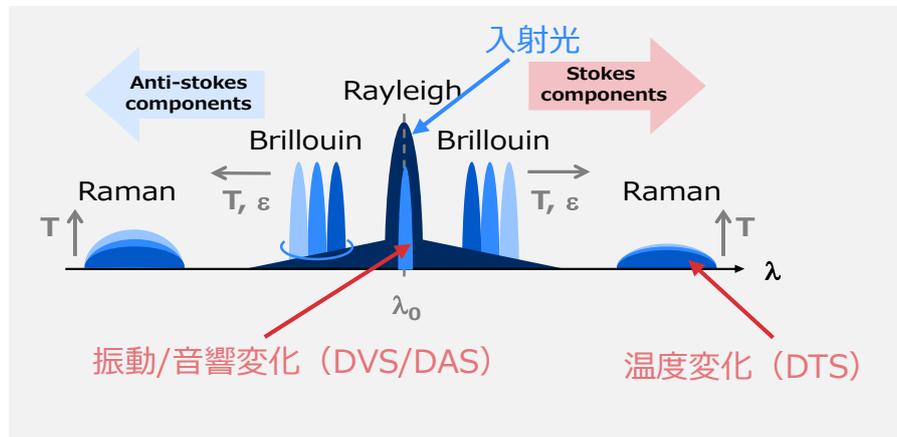
分布型ファイバセンシング：

分布型ファイバセンシングは、光ファイバ自体をセンサとして用いて、測定対象の温度・振動・音をモニタする技術である。原理を、以下図II-1に示す。分布型ファイバセンシング装置はパルス信号を光ファイバに入射する。パルス信号がファイバを伝送する際は、物理現象として後方散乱光が発生しており、分布型ファイバセンシング装置はその後方散乱光をパルス送信間隔毎に受信している。この状態で、光ファイバに振動、張力等による外乱変化が生じると、分布型ファイバセンシング装置が受信する後方散乱光に変化が生じる。さらに散乱光が発生するファイバ上の位置が遠くなるほど、パルス光を送信してから散乱光が戻ってくるまでの時間差が大きくなることから、この時間差を計測することにより、散乱光のファイバ上での発生位置を特定することが可能である。このようにファイバセンシングは後方散乱光を解析することにより、ファイバに沿って振動・温度のモニタリングを実現している。



図II-1 分布型ファイバセンシング

次に図Ⅱ-2で後方散乱光の波長分布を示す。振動変化のモニタリングの場合、ファイバの揺れによって生じる入射光と同じ波長で生じる Rayleigh 散乱光の位相変化を解析することにより実現している。この方式のファイバセンシング装置を Distributed Vibration Sensing(DVS)および Distributed Acoustic Sensing(DAS)と呼ぶ。温度のモニタリングの場合、温度変化によって生じる Raman 散乱光の強度変化を解析することにより実現する。この方式のファイバセンシング装置を Distributed Temperature Sensing(DTS)と呼ぶ。



図Ⅱ-2 後方散乱光の波長分布

III. 光ファイバセンシング技術の特徴

光ファイバセンシング技術の特徴を以下に示す。

- 線測定で俯瞰的に環境変化を捉えられる
- 既存のファイバ線を活用することで導入コストを抑えられる
- 昼夜、天候、電磁ノイズの影響がなく、高い環境耐性を有する（雨や雪、錆による劣化なし）
- 光ファイバは非給電かつセンサデバイスが省電力であり、メンテナンスが容易かつ停電時もセンサデバイスに給電可能であればセンシングが可能
- NEC 独自の技術の技術的特徴として長距離光通信技術の活用により、1 台の観測装置の測定距離として無中継で 50km（温度は 30km）までのモニタが可能であり、河川利用や交通の妨げとならない（観測装置は屋内への設置を想定している）

弊社製観測装置の仕様を以下に示す。

表Ⅲ-1：NEC 製 振動測定装置（SpectralWave LS）仕様

項目	仕様	備考
測定距離	50 km (0.2dB/km)※	SMF における値
測定解像度	4 m	SMF における値

※ 0.2dB/km はファイバのロス係数

表Ⅲ-2：NEC 製 温度測定装置（SpectralWave LS1000）仕様

項目	仕様	備考
測定距離	30 km (0.2dB/km) ※	SMF における値
測定解像度	4 m	SMF における値

※ 0.2dB/km はファイバのロス係数

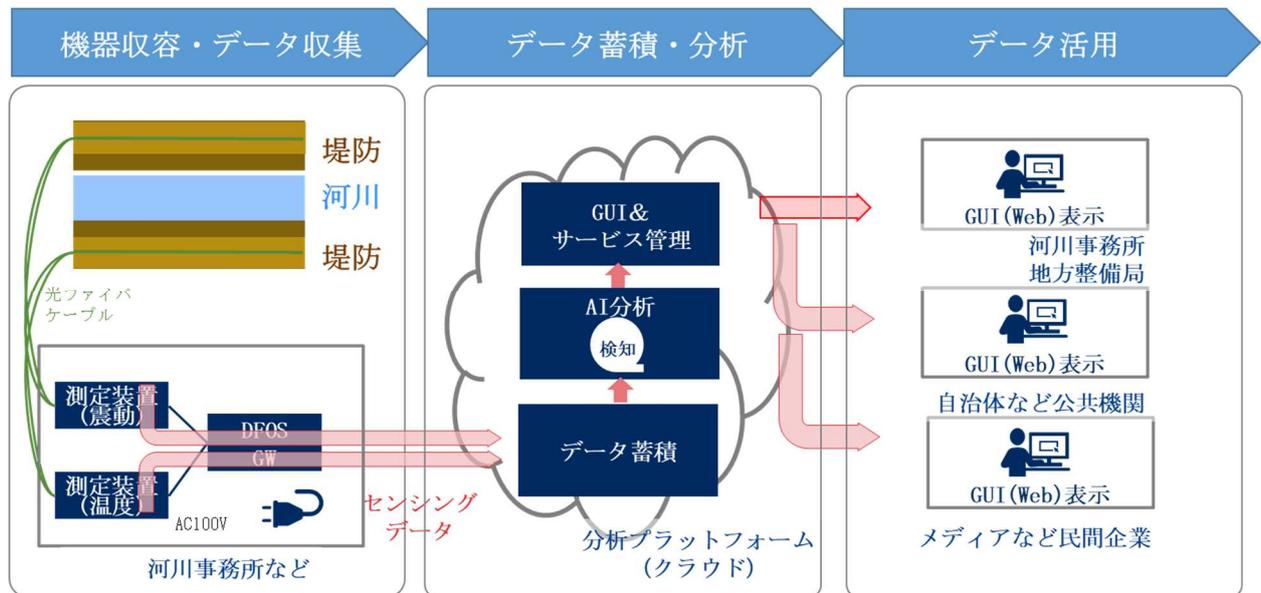
このセンシングデータを活用した分析システムの特徴として

- 取得したデータをクラウド上のストレージに蓄積する。
- AI 分析では、温度変化および振動パターンの変化によるターゲットとなる事象を自動検知する。
- 30 秒毎にデータを解析し、数百 m から数 km 区間内で変状が発生した場合、その箇所を即時に検知し警報を発出できる。
- 天端高の低下の過程または天端幅の欠損の過程を連続的に検知できる。

IV. 現場実装で想定する配置方法

1. 配置方法

国の管理する河川・道路管理用光ファイバの累計延長は約 38,000km を保有しておりファイバセンシングでは既設光ファイバ活用する事が可能なため、既設光ファイバにファイバセンシング測定装置を接続し、データ解析を行うことで河川状況の監視が可能となる。



図IV システム配置

※DFOS GW：データ収集 GW サーバ

a) 機器收容・データ収集

河川国道事務所などの地方整備局の出先機関または河川付近に新たに設置する管理事務所にて、1 観測区間当たり（数百 m～数 km 区間※）、振動測定装置、温度測定装置、データ収集 GW サーバをそれぞれ 1 台設置する。測定装置は汎用 19 インチラックに搭載可能であり、AC100V で動作する。測定装置にはそれぞれ個別に芯線を接続する。測定装置にて収集されたデータはデータ収集 GW サーバを経由しクラウド上の分析プラットフォームに送られる。データ収集 GW サーバ～クラウド間は帯域保証型のインターネット回線サービスで構築する。

※技術的には 50km（温度測定装置は 30km）まで測定可能

b) データ蓄積・分析

送付されたデータはクラウド上のストレージにて蓄積される。AI 分析では、温度変化および振動パターンの変化による堤防の異常発生を自動検知する。クラウド上に収集されたデータおよび AI 分析されたデータは GUI&サービス管理にて利用者が閲覧可能な形に加工/表示/配信される。

c) データ活用

GUI&サービス管理にて閲覧可能となったデータは、河川事務所・地方整備局での河川の監視に役立てられる他、自治体などの公共機関、メディアなどの民間企業でのデータ活用の可能性も考えられる。

2. コスト

2. 1 導入コスト

1km 以上で 1 つの観測システムを構築する前提※₁とし、100m あたり 300 万円（税込）以下での導入が可能である。

導入コストには以下が含まれる。

- ・機器（震動用、温度用）、データ収集 GW サーバ、分析プラットフォーム※₂、ストレージ用クラウド、構築、回線・クラウド初期導入費、設置調整。

また以下は既設設備を利用する想定とする。

- ・光ファイバケーブル、機器設置用建屋、AC100V 電源。

※₁ 設置想定区間について数百 m から数 km とされているが、前述のように無中継数十 km 観測が可能なシステムであり、観測距離を伸ばした方が費用対効果に優れるため、コスト試算の前提を 1km 以上としている。

※₂ 運用システムでは A I（機械学習）の活用が有効と考えており、検知状況と実態から教師データを作成し、随時学習していく必要がある。今回の実験に用いた評価システムではマニュアルで解析を行っており、A I は使用していない。

2. 2 維持管理コスト

2.1 の前提とした場合、100m あたり 100 万円/年（税込）以下での運用が可能である。

維持管理コストには以下が含まれる。

- ・検出用ソフトウェア使用料（ソフトウェアアップデート含む）
- ・保守（機器の監視、障害時の機器交換）
- ・運用（回線、クラウド利用料、機械学習の適用、定期報告、各種お問合せ）

V. 実験の計画

実験準備（1月6日12:00～17:00）

作業内容：

- 機器の設置
- FEP管それぞれにファイバケーブルを通した上で敷設ルートに引き回し
- ケーブル埋設した上で踏み固め、疎通確認

越水実験（1月7日10:00～17:00）

作業内容：

- 定常状態の確認
 - ・ 水を流す前の定常時の振動/温度の測定。
- 実験観測
 - ・ 越水時の振動/温度を測定。

河岸侵食実験（1月8日10:00～17:00）

作業内容：

- 定常状態の確認
 - ・ 河岸侵食前に堤防が流れない水量にて定常時の振動/温度の測定。
- 実験観測
 - ・ 河岸侵食時の振動/温度の測定。

VI. 実験結果

1. 実験内容

光ファイバセンシングにより、振動測定装置及び温度測定装置を用いて越水実験及び河岸侵食実験を行い、振動および温度を測定し、振動強度、振動の周波数特性、温度の変化から、堤防の異常発生の検知可否を実験した。具体的には下記を実験した。

・越水実験

- ① 越水の検知可否
- ② 越水における堤防の欠損の検知可否
- ③ 越水における堤防の欠損量の検知可否

越水実験は堤内地側と堤外地側の両方に光ファイバを埋設し、それぞれの埋設位置で検知可否を実験した。

・河岸侵食実験

- ① 侵食による堤防欠損の検知
- ② 侵食による堤防の欠損量の検知

河岸侵食実験は、一般部、橋台部、橋台・護岸部を模擬し、それぞれの箇所検知可否を実験した。

・その他

- ① 水位・流量の測定

2. 実験環境

2-1. 測定内容

2-1-1. 観測装置

越水実験と河岸侵食実験におけるデータ測定は、NEC 製 振動測定装置 (SpectralWave LS) と NEC 製 温度測定装置 (SpectralWave LS1000) を用いて実施した。

2-1-2. 測定したデータの種類

振動測定装置では、振動を Waterfall データと Raw データの 2 種類で測定した。温度測定装置では、温度データを測定した。測定した 3 種類のデータについての説明を以下に示す。

(1) 振動の Waterfall データ

Waterfall データは、測定区間全域において一定の距離ごとに振動強度を測定する。比較的少ないデータ容量で全区間を測定することが可能である。振動強度による実験は、Waterfall データを用いている。

(2) 振動の Raw データ

Raw データは、指定した測定ポイントにおいて振動振幅をサンプリング周波数単位で、高精度、高分解能で測定することが可能である。周波数特性による実験は Raw データを用いている。

(3) 温度データ

温度データは、測定区間全域において一定の距離ごとに、温度を時間単位で測定することが可能である。温度による実験は温度データを用いている。

2-1-3. 測定パラメータ

測定パラメータを表 1 に示す。

測定解像度は、振動を感知する範囲を示す。本実験における測定解像度は 4m であり、ある測定点の測定値はその測定点から ±2m の範囲の振動/温度の測定値を示す。

距離分解能はデータを記録するときの距離方向の粒度を示す。本実験における距離分解能は 0.8m であることから、測定区間全域において 0.8m の距離ごとに ±2m の範囲の振動/温度を測定して記録する

※本実験では越水実験設備が 5 分の 1 スケールであったため 0.8m で測定した。距離分解能はモニタする区間とのトレードオフがあり、50km をモニタする場合には 4m となる。本報告書は距離分解能に依存しない解析を行っているため、本報告書の結論は距離分解能 4m にも適用可能である。

表 1 測定パラメータ

データ種別	測定解像度	距離分解能	サンプリング間隔
Raw データ	4m	-※1	0.0005 秒(2kHz)
Waterfall データ	4m	0.8m	0.0005 秒(2kHz)
温度データ	4m	0.8m	20 秒

※1 Raw データは測定ポイントを指定するため、距離分解能は無し。

2-2. 測定箇所

2-2-1. 越水実験

越水実験の光ファイバのルートと考察対象箇所を図 1 に、堤防内の光ファイバの埋設位置を図 2 に示す。光ファイバのルート全ての区間で振動と温度を測定した。考察対象箇所は、このうち堤内地側と堤外地側(水に近い側)の 2 箇所の堤防中央部とし、この 2 箇所の測定値を用いて実験する。堤内地側は公募者用プレハブ内に設置した観測装置から光ファイバのケーブル長で 166m 付近、堤外地側は光ファイバのケーブル長で 162m 付近である。堤防内の埋設箇所は、FEP 管の管路内に光ファイバを配線した。

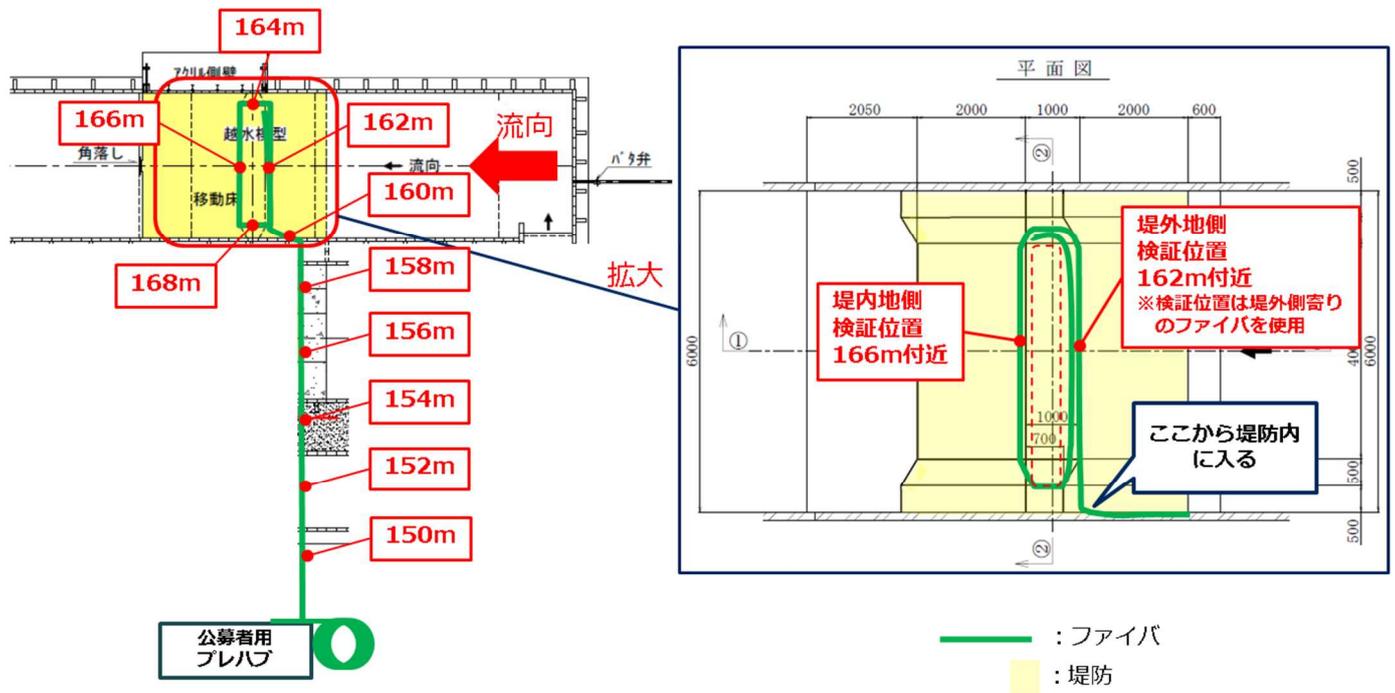


図 1 越水実験 光ファイバのルートと考察対象箇所

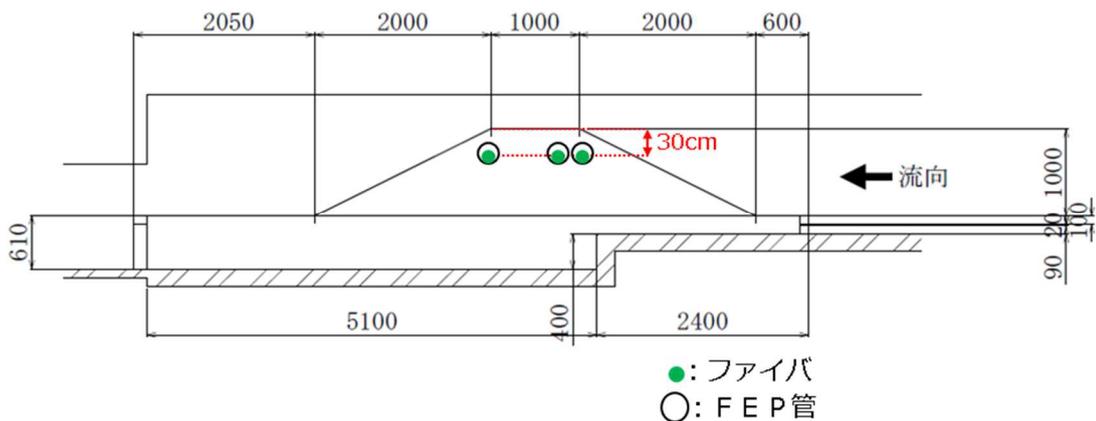


図 2 越水実験 堤防内の光ファイバの埋設位置

2-2-2. 河岸侵食実験

河岸侵食実験の光ファイバのルートと考察対象箇所を図 3 に、堤防内の光ファイバの埋設位置を図 4 に示す。光ファイバのルート全ての区間で振動と温度を測定した。考察対象箇所は、このうち一般部、橋台部、橋台・護岸部の 3 箇所とし、この 3 箇所の測定値を用いて実験する。一般部は公募者用プレハブ内に設置した観測装置から光ファイバのケーブル長で 238m 付近、橋台部は光ファイバのケーブル長で 245m 付近、橋台・護岸部は光ファイバのケーブル長で 254m 付近である。堤防内の埋設は、FEP 管の管路内に光ファイバを配線した。

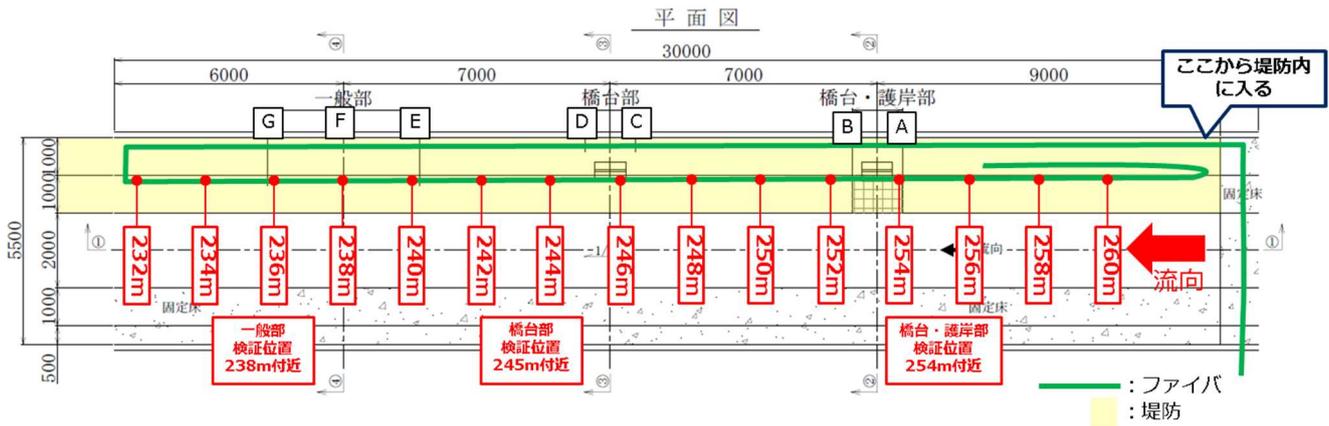


図 3 河岸侵食実験 光ファイバのルートと考察対象箇所

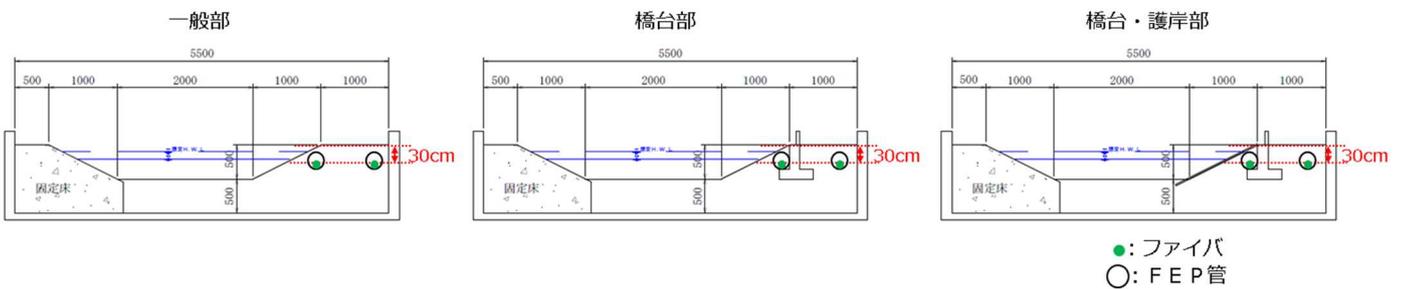


図 4 河岸侵食実験 堤防内の光ファイバ埋設位置

3. 実験結果

3-1. 越水実験結果

3-1-1. 測定結果

3-1-1-1. 堤防の状態

堤防の状態と、状態に変化が発生した時刻を表 2 に示す。

表 2 堤防の状態変化と時刻

堤防の状態	時刻
注水開始	12:40
越水開始	13:06:10
堤内地側 FEP 管露呈 (露呈開始)	13:09:17
(半分露呈)	13:12:08
(全て露呈)	13:13:34
堤外地側 FEP 管露呈 (露呈開始)	13:36:24
堤内外の FEP 管に水流が当たらない状態	14:20:30
注水終了	14:36

堤防の状態を写真 1～写真 10 に示す。堤防の状態の変化の時刻は、撮影した動画の画像から判断した。

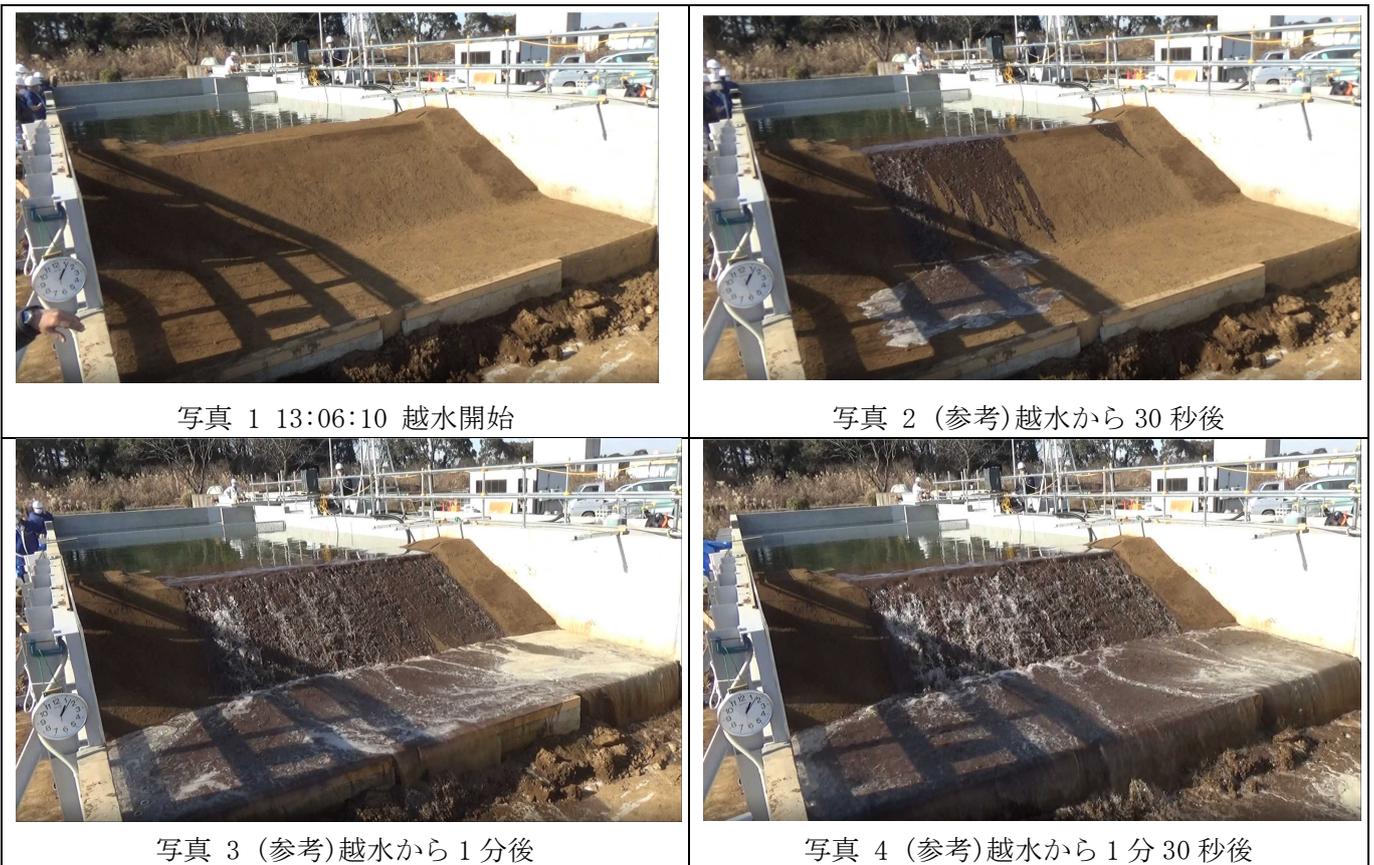




写真 5 (参考)越水から 2 分後



写真 6 13:09:07 堤内地側 FEP 管露呈(露呈開始)



写真 7 13:12:08 堤内地側 FEP 管露呈(半分露呈)



写真 8 13:13:34 堤内地側 FEP 管露呈(全て露呈)



写真 9 13:36:24 堤外地側 FEP 管露呈(露呈開始)
※堤内地側 FEP 管は水流が当たる状態



写真 10 14:20:30 堤内外の FEP 管に水流が当たらない状態

3-1-1-2. 水位

水位の測定結果を図 5 に示す。水位 0m を超える 12:44:30 を貯水開始時刻とする。

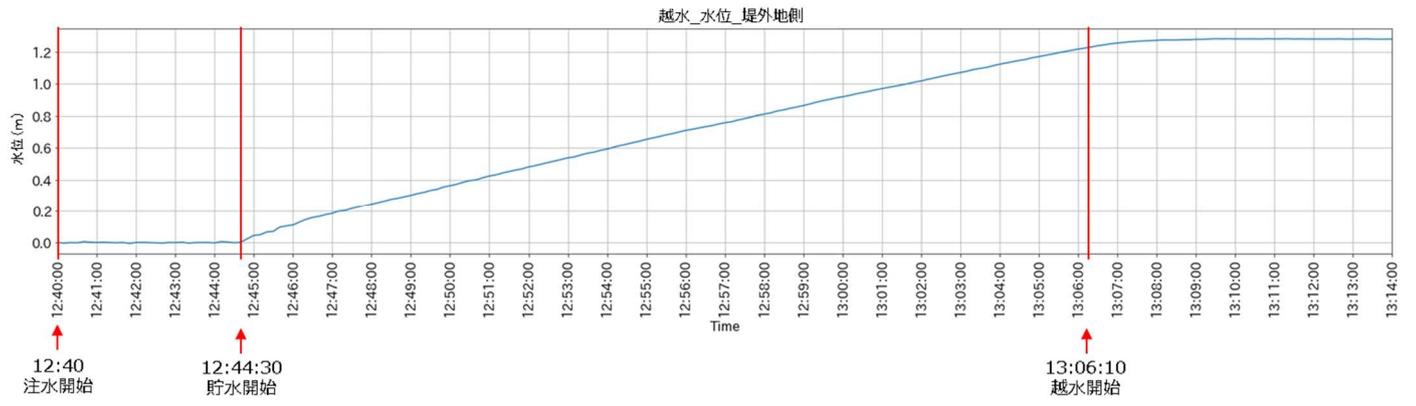


図 5 越水実験 堤外地側の水位測定結果

3-1-1-3. 振動

振動の測定結果を図 6 に示す。分析対象の 160~170m 地点を抜粋する。

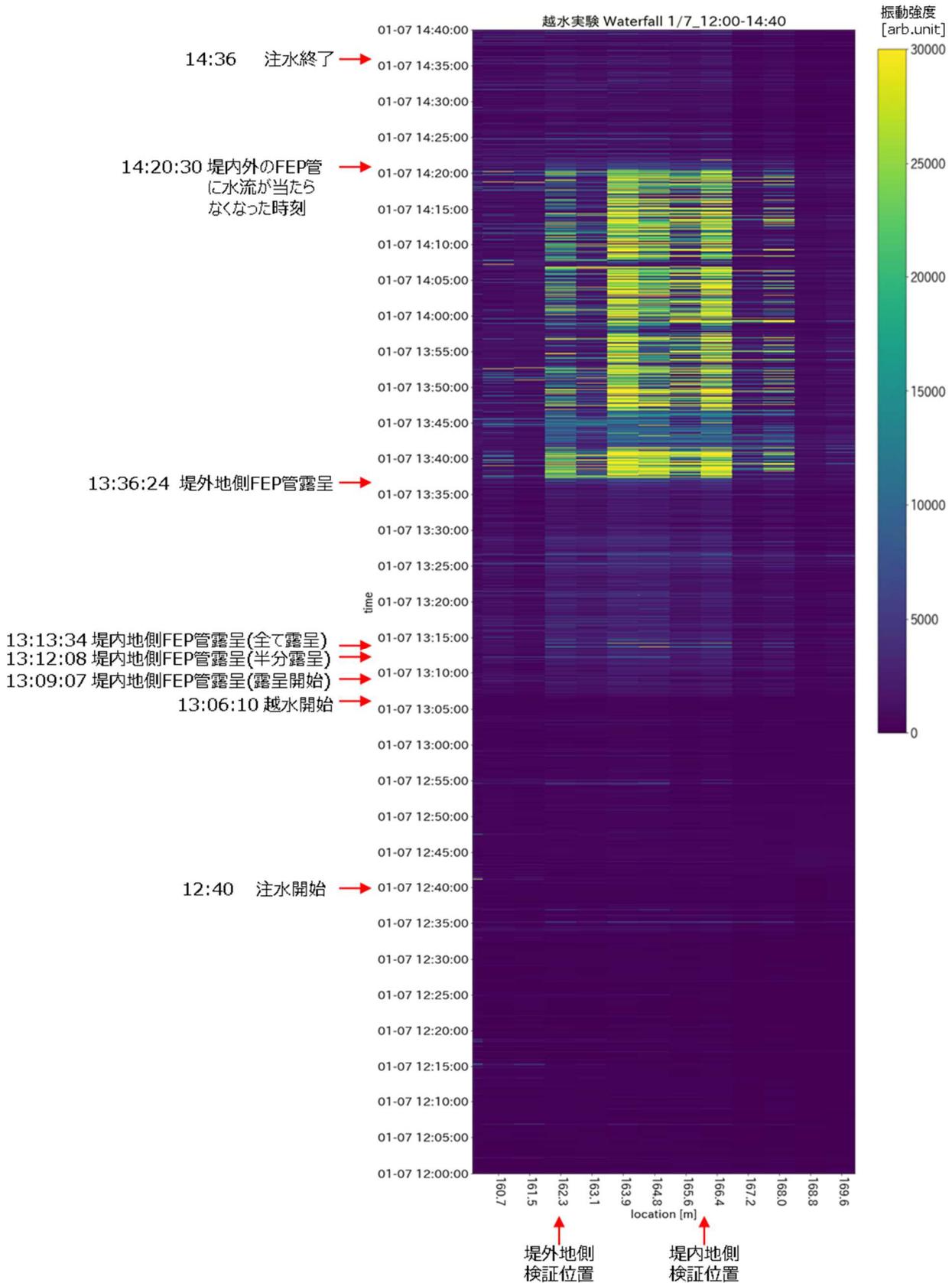


図 6 越水実験 振動の測定結果

3-1-1-4. 温度

温度の測定結果を図 7 に示す。

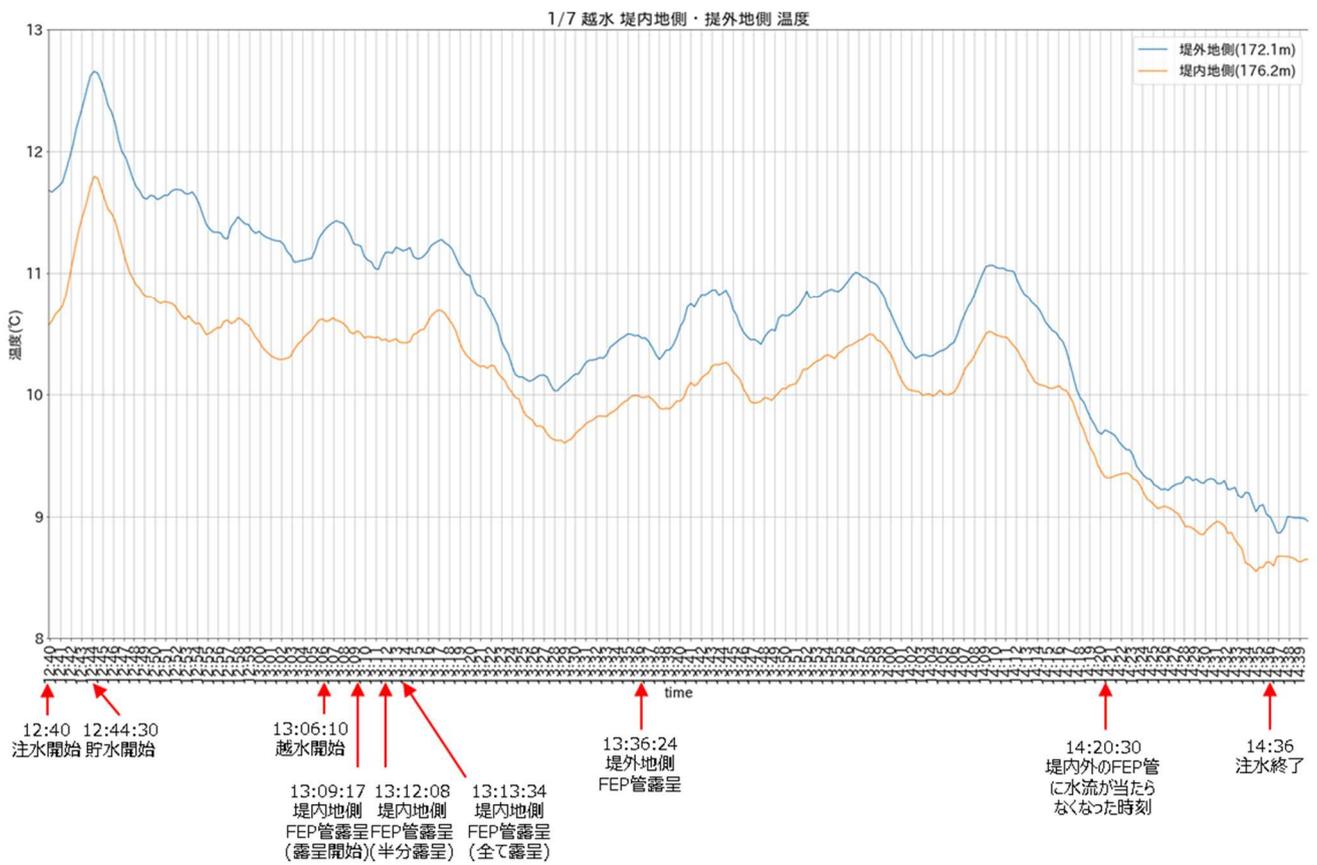


図 7 越水実験 温度の測定結果

3-1-2. 振動強度による実験結果

3-1-2-1. 堤内地側

越水実験における堤内地側の振動強度の時間変化を図 8 に示す。1 分ごとの振動強度を表 3 に示す。いずれも値は、測定値を 1 分の移動平均で算出した値である。

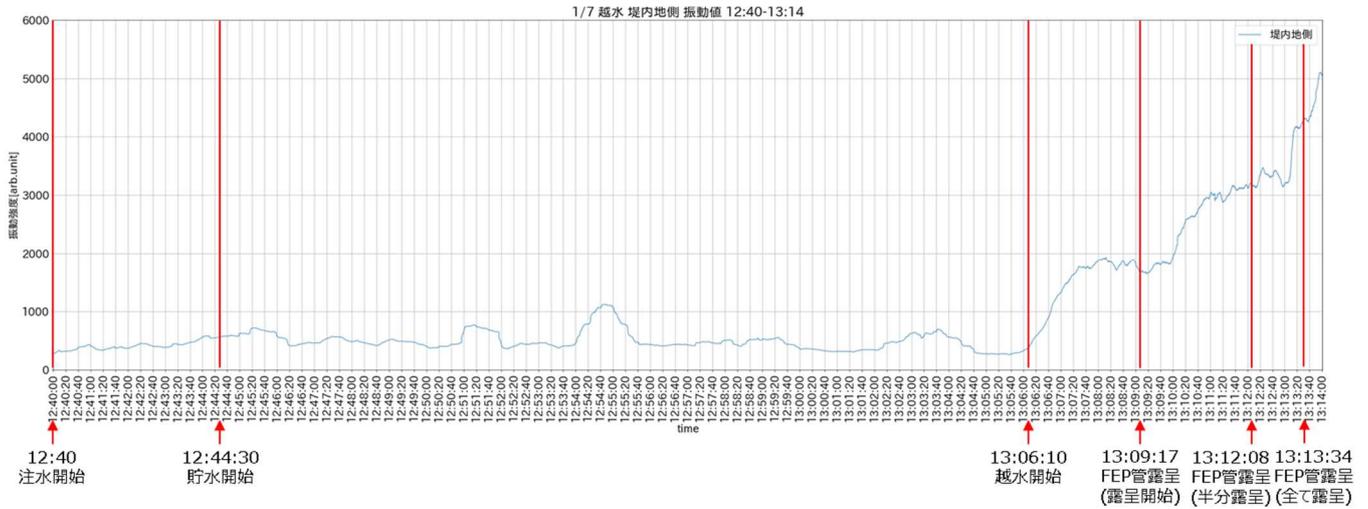


図 8 越水実験における堤内地側の振動強度

表 3 越水実験における堤外地側の振動強度 (1 分ごと)

時刻	振動強度 (arb.)	状態	時刻	振動強度 (arb.)	状態
12:40	290	12:40 注水開始	13:00	353	13:06:10 越水開始
12:41	392		13:01	317	
12:42	381	12:44:30 貯水開始	13:02	336	
12:43	387		13:03	637	
12:44	573		13:04	546	
12:45	622		13:05	271	
12:46	549		13:06	351	
12:47	460		13:07	1408	
12:48	489		13:08	1884	
12:49	523		13:09	1729	
12:50	375	13:10	2055		
12:51	741	13:11	3001		
12:52	373	13:13:34 FEP 管露呈 (全て露呈)	13:12	3201	
12:53	460		13:13	3215	
12:54	567		13:14	5019	
12:55	967		13:15	2889	
12:56	425				
12:57	418				
12:58	509				
12:59	520				

越水実験における堤内地側の振動強度で、水位の測定、越水の検知、越水による堤防の欠損の検知の3項目を実験した。実験結果を表4に示す。

振動強度による水位の測定について、水位0m（貯水開始直後）から、水位1.3m（越水開始直前）にかけて振動強度の変化を観察した。水位0mは振動強度が622 arb.、水位1mは351 arb.であり、水位による振動強度の有意な変化は確認できなかった。

振動強度による越水の検知について、越水前（水位0m～1.3m）と越水後の振動強度の変化を観察した。越水前は振動強度が271～741arb.、越水開始時は1408 arb.以上であり、越水が始まることにより振動強度が明確に強まることが確認できた。その後、越水範囲が実験堤防全幅に拡大すると振動強度が1884 arb.に強まり、越水範囲の拡大に応じて、振動強度が強まることが確認できた。

振動強度による越水時の堤防の欠損の検知について、欠損の進行に伴う振動強度の変化を観察した。越水開始の振動強度は1408 arb.、欠損が進行している越水後1分経過は1884 arb.、2分経過は1729 arb.であり、越水に伴う堤防欠損が生じると振動強度が明確に強まることが確認できた。ただし、FEP管が露呈するまでは、堤防欠損の進行度合いに伴う有意な変化は確認できなかった。

また、FEP管露呈（露呈開始）は2055 arb.、FEP管露呈（半分露呈）は3201 arb.、FEP管露呈（全て露呈）は5019 arb.であり、堤防の欠損によりFEP管が露呈すると振動強度が明確に強まることが確認できた。また、FEP管に直接接する堤防の欠損では、欠損の進行度合いに伴い振動強度が強まることが確認できた。

表4 越水実験における堤内地側の振動強度による実験結果

観測対象	観測手法	堤防の状態	振動強度 (arb.)
水位の測定	水位0m（貯水開始直後）から、水位1m（越水開始直前）にかけての振動強度の変化	水位0m（貯水開始直後）	622
		水位1.3m（越水開始直前）	351
越水の検知	越水前（水位0m～1.3m）と越水後の振動強度の変化	越水前（水位0m～1.3m）	271～741
		越水開始	1408
		越水範囲の拡大（越水から1分経過）	1884
越水による堤防欠損の検知	堤防の欠損の進行に伴う振動強度の変化	越水開始	1408
		堤防欠損（越水から1分経過）	1884
		堤防欠損（越水から2分経過）	1729
		堤防欠損（FEP管露呈（露呈開始））	2055
		堤防欠損（FEP管露呈（半分露呈））	3201
		堤防欠損（FEP管露呈（全て露呈））	5019

※12:55に振動強度967を検知したが、瞬時であるため周辺環境の振動と判断して除外する。

3-1-3-2. 堤外地側

越水実験における堤外地側の振動強度の時間変化を図 9 に示す。1 分ごとの振動強度を表 5 に示す。いずれも値は、測定値を 1 分の移動平均で算出した値である。

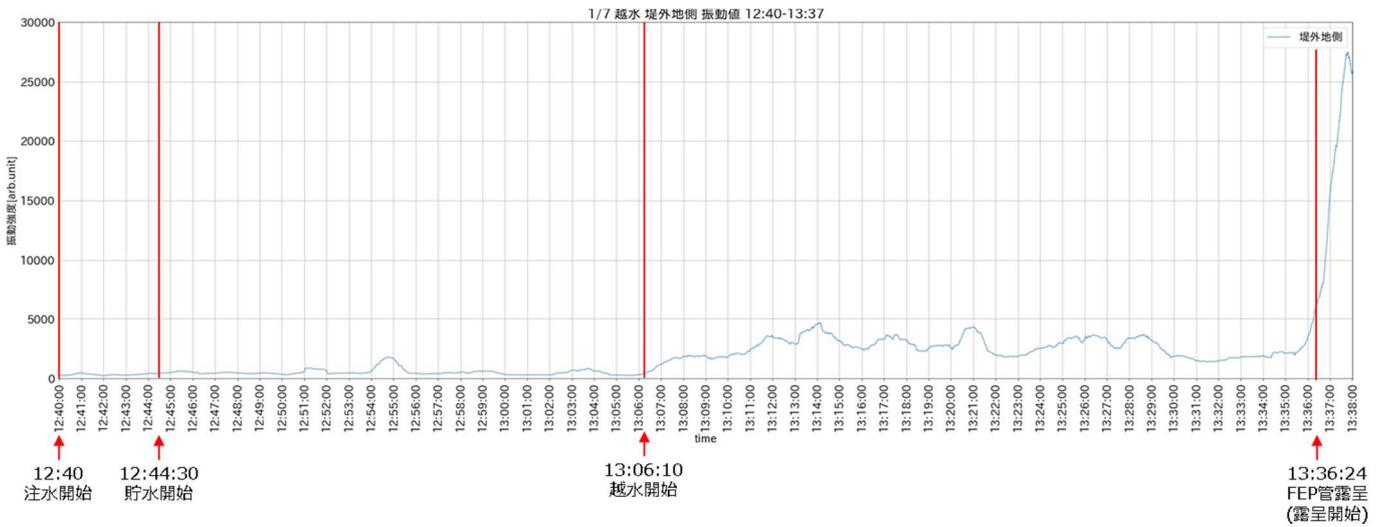


図 9 越水実験における堤外地側の振動強度

表 5 越水実験における堤外地側の振動強度 (1 分ごと)

時刻	振動強度 (arb.)	堤防の状態	時刻	振動強度 (arb.)	堤防の状態	時刻	振動強度 (arb.)	堤防の状態
12:40	236	12:40 注水開始 12:44:30 貯水開始	13:00	333	13:06:10 越水開始	13:20	2565	
12:41	469		13:01	325		13:21	4278	
12:42	248		13:02	314		13:22	1996	
12:43	300		13:03	703		13:23	1878	
12:44	429		13:04	647		13:24	2530	
12:45	533		13:05	294		13:25	2952	
12:46	517		13:06	330		13:26	3311	
12:47	450		13:07	1177		13:27	3258	
12:48	466		13:08	1840		13:28	3351	
12:49	454		13:09	1873		13:29	3198	
12:50	367		13:10	1829		13:30	1880	
12:51	663		13:11	2433		13:31	1499	
12:52	613		13:12	3457		13:32	1468	
12:53	481		13:13	2902		13:33	1789	
12:54	602		13:14	4530		13:34	1911	
12:55	1657		13:15	3185		13:35	2130	
12:56	445		13:16	2495				
12:57	426		13:17	3327				
12:58	538		13:18	3198				
12:59	614	13:19	2562					

※12:55 に振動強度 1657 を検知したが、瞬時であるため周辺環境の振動と判断し除外する。

13:36 に堤内地側の FEP 管が堤防から外れ堤外地側の測定に影響が生じたため以降の時間は除外する。

越水実験における堤外地側の振動強度で、水位の測定、越水の検知、越水による堤防の欠損の検知の3項目を実験した。実験結果を表6に示す。

振動強度による水位の測定について、水位0m（貯水開始直後）から、水位1.3m（越水開始直前）にかけて振動強度の変化を観察した。水位0mは振動強度が290 arb.、水位1mは271 arb.であり、水位による振動強度に有意な変化は見られなかった。

振動強度による越水の検知について、越水前（水位0m～1.3m）と越水後の振動強度の変化を観察した。越水前は振動強度が271～741 arb.、越水開始時は1408 arb.以上であり、越水が始まることにより振動強度が明確に強まることが確認できた。その後、越水範囲が実験堤防全幅に拡大すると振動強度が1884 arb.に強まり、越水範囲の拡大に応じて、振動強度が強まることが確認できた。

振動強度による越水の検知について、越水前（水位0m～1.3m）と越水後の振動強度の変化を観察した。越水前は振動強度が294～703 arb.、越水開始時は1177 arb.以上であり、越水が始まることにより振動強度が明確に強まることが確認できた。その後、越水範囲が実験堤防全幅に拡大すると振動強度が1840に強まり、越水範囲の拡大に応じて、振動強度が強まることが確認できた。

振動強度による越水時の堤防の欠損の検知について、欠損の進行に伴う振動強度の変化を観察した。越水開始の振動強度は1177、欠損が進行している越水後1分経過は1840 arb.、2～28分経過は1829～4530 arb.であり、越水に伴う堤防欠損が生じると振動強度が明確に強まることが確認できた。ただし、堤防欠損の進行度合いに伴う有意な変化は確認できなかった。

表6 越水実験における堤外地側の振動強度による実験結果

観測対象	観測手法	堤防の状態	振動強度 (arb.)
水位の測定	水位0m（貯水開始直後）から、水位1.3m（越水開始直前）にかけての振動強度の変化	水位0m（貯水開始直後）	533
		水位1.3m（越水開始直前）	330
越水の検知	越水前（水位0m～1.3m）と越水後の振動強度の変化	越水前（水位0m～1.3m）	294～703
		越水開始	1177
		越水範囲の拡大（越水から1分経過）	1840
越水による堤防欠損の検知	堤防の欠損の進行に伴う振動強度の変化	越水開始	1177
		堤防欠損（越水から1分経過）	1840
		堤防欠損（越水から2～28分経過）	1829～4530

3-1-3. 振動の周波数特性による実験結果

3-1-3-1. 堤内地側

越水実験における堤内地側の周波数特性の時間変化を図 10 に示す。1 分ごとの信号成分の強さが 1.0 以上の周波数範囲を表 7 に示す。

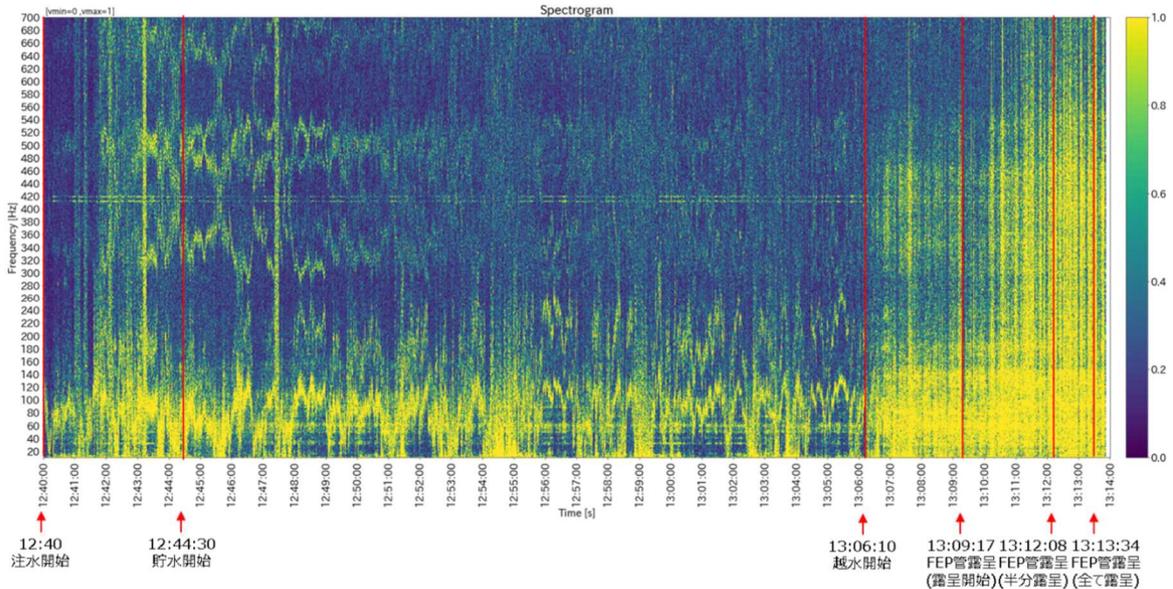


図 10 越水実験における堤内地側の周波数特性（10～700Hz）

表 7 越水実験における堤内地側の信号成分が 1.0 以上の周波数範囲

時刻	周波数 範囲 (Hz)	堤防の 状態	時刻	周波数 範囲 (Hz)	堤防の 状態	時刻	周波数 範囲 (Hz)	堤防の 状態
12:40	10～140	12:40 注水開始	12:55	10～260	13:06:10 越水開始	13:10	10～540	13:09:17
12:41	10～140		12:56	10～260		13:11	10～700 超	FEP 管露呈
12:42	10～260		12:57	10～260		13:12	10～700 超	(露呈開始)
12:43	10～260		12:58	10～260		13:13	10～700 超	13:13:34
12:44	10～260		12:59	10～260		13:14	10～700 超	FEP 管露呈
12:45	10～260		13:00	10～260		13:15	10～700 超	(全て露呈)
12:46	10～260		13:01	10～260				
12:47	10～260		13:02	10～260				
12:48	10～260		13:03	10～260				
12:49	10～260		13:04	10～260				
12:50	10～260		13:05	10～260				
12:51	10～260		13:06	10～540				
12:52	10～260		13:07	10～540				
12:53	10～260		13:08	10～540				
12:54	10～260	13:09	10～540					

※周波数範囲の値は周波数特性の図を目視で確認した値を示す。

410Hz と 420Hz の周波数成分および 10～700Hz 超の範囲で瞬時発生する振動は、貯水状況に関わらず発生しており環境振動と考えられるため分析対象から除外する。

越水実験における堤内地側の周波数特性で、水位の測定、越水の検知、越水による堤防の欠損の検知の

3項目を実験した。実験結果を表8に示す。

周波数特性による水位の測定について、水位0m（貯水開始直後）から、水位1.3m（越水開始直前）にかけて周波数ごとの信号成分の強さの変化を観察した。水位0m、水位1.3mいずれも10～260Hzの周波数範囲で信号成分を強く検出しており、有意な差は見られなかった。

周波数特性による越水の検知について、越水前（水位0m～1.3m）と越水後における周波数ごとの信号成分の強さの変化を観察した。越水前は10Hz～260Hz、越水後は10Hz～540Hzの周波数範囲で信号成分を強く検出しており、越水後は周波数範囲が高周波側に広まることが明確に確認できた。

周波数特性による越水時の堤防の欠損の検知について、欠損の進行に伴う周波数特性の変化を観察した。越水開始後、越水後1分経過、越水後2分経過、FEP管露呈（露呈開始）、FEP管露呈（半分露呈）、FEP管露呈（全て露呈）のいずれも、10Hz～540Hzの周波数範囲で信号成分を強く検出しており、堤防欠損の進行度合いに伴う有意な変化は確認できなかった。

表8 越水実験における堤内地側の周波数特性による実験結果

観測対象	観測手法	堤防の状態	周波数範囲(Hz)
水位の測定	水位0m（貯水開始直後）から、水位1.3m（越水開始直前）にかけての周波数特性の変化	水位0m（貯水開始直後）	10～260
		水位1.3m（越水開始直前）	10～260
越水の検知	越水前（水位0m～1.3m）と越水後の周波数特性の変化	越水前（水位0m～1.3m）	10～260
		越水開始	10～540
		越水範囲の拡大	10～540
越水による堤防欠損の検知	堤防の欠損の進行に伴う周波数特性の変化	越水開始	10～540
		堤防欠損（越水から1分経過）	10～540
		堤防欠損（越水から2分経過）	10～540
		堤防欠損（FEP管露呈（露呈開始））	10～540
		堤防欠損（FEP管露呈（半分露呈））	10～540
		堤防欠損（FEP管露呈（全て露呈））	10～540

3-1-3-2. 堤外地側

越水実験における堤外地側の周波数特性の時間変化を図 11 に示す。1 分ごとの信号成分の強さが 1.0 以上の周波数範囲を表 9 に示す。

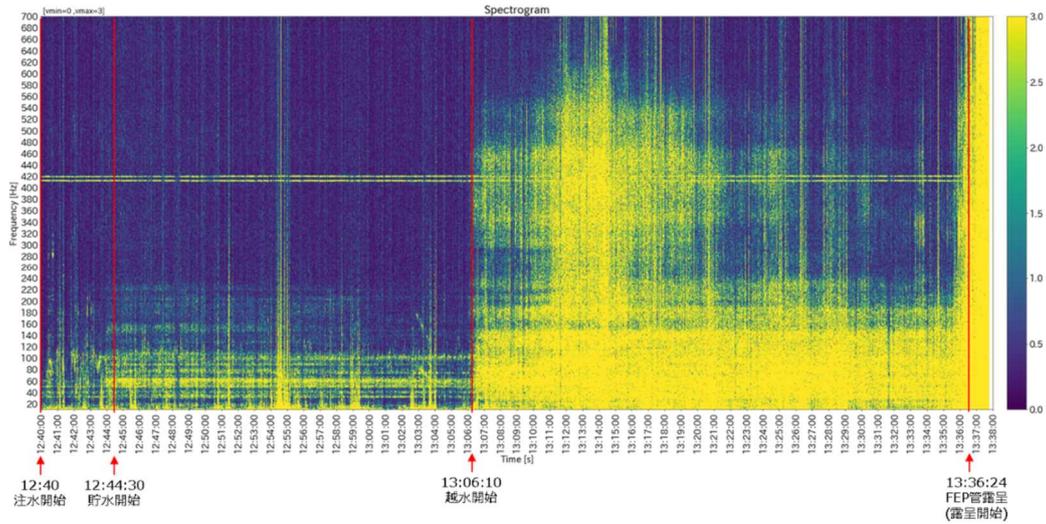


図 11 越水実験における堤外地側の周波数特性 (10~700Hz)

表 9 越水実験における堤内地側の信号成分が 1.0 以上の周波数範囲 (1 分ごと)

時刻	周波数 範囲 (Hz)	堤防の 状態	時刻	周波数 範囲 (Hz)	堤防の 状態	時刻	周波数 範囲 (Hz)	堤防の 状態		
12:40	10~120	12:40	13:00	10~220	13:06:10 越水開始	13:20	10~580			
12:41	10~120			注水開始			13:01		10~220	13:21
12:42	10~120	12:44:30 貯水開始		13:02			10~220		13:22	10~580
12:43	10~120			13:03			10~220		13:23	10~580
12:44	10~120			13:04			10~220		13:24	10~580
12:45	10~220			13:05			10~220		13:25	10~580
12:46	10~220			13:06			10~220		13:26	10~580
12:47	10~220			13:07			10~580		13:27	10~580
12:48	10~220			13:08			10~580		13:28	10~580
12:49	10~220			13:09			10~580		13:29	10~580
12:50	10~220			13:10			10~580		13:30	10~580
12:51	10~220			13:11			10~580		13:31	10~580
12:52	10~220	13:12		10~580			13:32		10~580	
12:53	10~220	13:13		10~580			13:33		10~580	
12:54	10~220	13:14		10~580			13:34		10~580	
12:55	10~220	13:15		10~580			13:35		10~580	
12:56	10~220	13:16		10~580						
12:57	10~220	13:17		10~580						
12:58	10~220	13:18		10~580						
12:59	10~220	13:19	10~580							

※周波数範囲の値は周波数特性の図を目視で確認した値を示す

13:36 に堤内地側の FEP 管が堤防から外れ堤外地側の測定に影響が生じたため以降の時間は除外する。

越水実験における堤外地側の周波数特性で、水位の測定、越水の検知、越水による堤防の欠損の検知の3項目を実験した。実験結果を表10に示す。

周波数特性での水位の測定について、水位0m（貯水開始直後）から、水位1.3m（越水開始直前）にかけて周波数ごとの信号成分の強さの変化を観察した。水位0m、水位1.3mいずれも10～220Hzの周波数範囲で信号成分を強く検出しており、有意な差は見られなかった。

周波数特性での越水の検知について、越水前（水位0m～1.3m）と越水後における周波数ごとの信号成分の強さの変化を観察した。越水前は10Hz～260Hz、越水後は10Hz～580Hzの周波数範囲で信号成分を強く検出しており、越水後は周波数範囲が高周波側に広まることが明確に確認できた。

周波数特性での越水による堤防の欠損の検知について、欠損の進行に伴う周波数特性の変化を観察した。越水開始、越水後1分経過、越水後2分経過、FEP管露呈（露呈開始）のいずれも、10Hz～580Hzの周波数範囲で信号成分を強く検出しており、堤防欠損の進行度合いに伴う有意な変化は確認できなかった。

表10 越水実験における堤外地側の周波数特性による実験結果

観測対象	観測手法	堤防の状態	周波数範囲(Hz)
水位の測定	水位0m（貯水開始直後）から、水位1.3m（越水開始直前）にかけての周波数特性の変化	水位0m（貯水開始直後）	10～220
		水位1.3m（越水開始直前）	10～220
越水の検知	越水前（水位0m～1.3m）と越水後の周波数特性の変化	越水前（水位0m～1.3m）	10～220
		越水開始	10～580
		越水範囲の拡大	10～580
越水による堤防欠損の検知	堤防の欠損の進行に伴う周波数特性の変化	越水開始	10～580
		堤防欠損（越水から1分経過）	10～580
		堤防欠損（越水から2～28分経過）	10～580

3-1-4. 温度による実験結果

越水実験における堤内地側の気温との温度差の時間変化を図 12 に示す。1 分ごとの温度差を表 11 に示す。日中の気温変化に伴う影響を除くため、いずれも値はファイバが露呈している 150m 地点の大気中の温度と堤内地側地点の温度差の値を算出した。

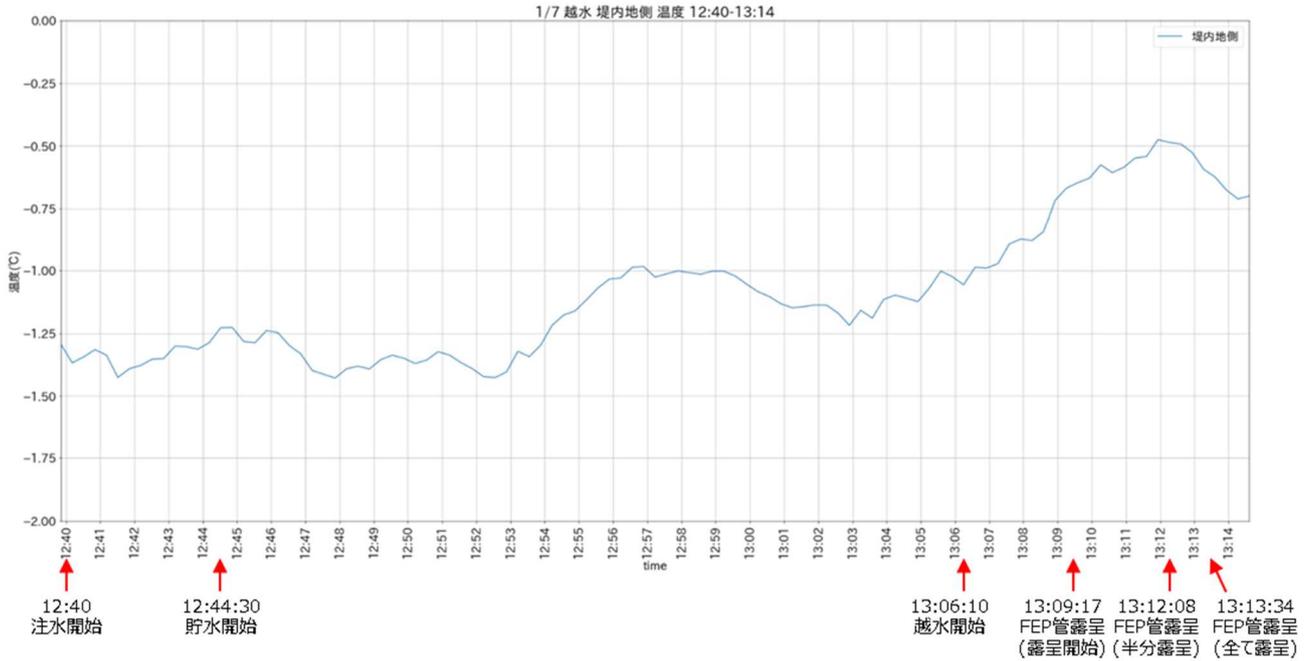


図 12 越水実験における堤内地側の気温との温度差の時間変化

表 11 越水実験における堤内地側の気温との温度差の時間変化 (1 分ごと)

時刻	温度差 (°C)	堤防の状態	時刻	温度差 (°C)	堤防の状態	時刻	温度差 (°C)	堤防の状態
12:40	-1.29	12:44:30 貯水開始	12:55	-1.16	13:06:10 越水開始	13:10	-0.63	13:09:17
12:41	-1.32		12:56	-1.03		13:11	-0.59	FEP 管露呈
12:42	-1.39		12:57	-0.98		13:12	-0.47	(露呈開始)
12:43	-1.35		12:58	-1.00		13:13	-0.53	13:13:34
12:44	-1.31		12:59	-1.00		13:14	-0.68	FEP 管露呈
12:45	-1.23		13:00	-1.05		13:15	-0.76	(全て露呈)
12:46	-1.24		13:01	-1.13				
12:47	-1.33		13:02	-1.14				
12:48	-1.43		13:03	-1.22				
12:49	-1.39		13:04	-1.12				
12:50	-1.35		13:05	-1.12				
12:51	-1.32		13:06	-1.02				
12:52	-1.39		13:07	-0.99				
12:53	-1.40		13:08	-0.87				
12:54	-1.30	13:09	-0.72					

越水実験における堤内地側の温度で、水位の測定、越水の検知、越水による堤防の欠損の検知の3項目を実験した。実験結果を表12に示す。

温度による水位の測定について、水位0m（貯水開始直後）から、水位1.3m（越水開始直前）にかけて気温との温度差の変化を観察した。水位0mの温度差は-1.23℃、水位1.3mであり、水位の上昇に伴い、気温との温度差が縮小することが確認できた。

温度による越水の検知について、越水前（水位0m～1.3m）と越水後における気温との温度差の変化を観察した。越水前の温度差は-1.02℃、越水開始時は-0.99℃、越水範囲が拡大すると-0.87℃であり、越水が始まること、越水範囲の拡大に伴い、気温との温度差が縮小することが確認できた。

温度による越水時の堤防の欠損の検知について、欠損の進行に伴う気温との温度差の変化を観察した。越水開始時の温度差は-0.99℃、越水後1分経過は-0.72℃、越水後2分経過は-0.72℃、FEP管露呈（露呈開始）は-0.63℃であり、越水に伴う堤防欠損が生じると気温との温度差が縮小することが確認できた。ただし、FEP管の露呈開始時の気温との温度差は-0.63℃、半分露呈は-0.53℃、全て露呈は-0.76℃であり、FEP管露呈の進行度合いに伴う有意な変化は確認できなかった。

表12 越水実験における気温との温度差による実験結果

観測対象	観測手法	堤防の状態	温度差 (℃)
水位の測定	水位0m（貯水開始直後）から、水位1.3m（越水開始直前）にかけての気温との温度差の変化	水位0m（貯水開始直後）	-1.23
		水位1.3m（越水開始直前）	-1.02
越水の検知	越水前（水位0m～1.3m）と越水後の気温との温度差の変化	越水前（水位0m～1.3m）	-1.02
		越水開始	-0.99
		越水範囲の拡大（越水から1分経過）	-0.87
越水による堤防の欠損	堤防の欠損の進行に伴う気温との温度差の変化	越水開始	-0.99
		堤防欠損（越水から1分経過）	-0.87
		堤防欠損（越水から2分経過）	-0.72
		堤防欠損（FEP管露呈（露呈開始））	-0.63
		堤防欠損（FEP管露呈（半分露呈））	-0.53
		堤防欠損（FEP管露呈（全て露呈））	-0.64

3-2. 河岸侵食実験結果

3-2-1. 測定結果

3-2-1-1. 堤防の状態

堤防の一般部の状態と、状態に変化が発生した時刻を表 13 に示す。

表 13 一般部の状態変化と時刻

堤防の状態	時刻
注水開始 (流量 50L/s)	14:10
水位上昇開始	14:19
流量変更 (流量 300L/s)	14:26
一般部の近辺で作業 (開始)	14:30
(終了)	14:35
流量変更 (流量 400L/s)	14:35
水制(板)設置	14:35
堤防の部分崩落 (土塊で落下)	14:38
堤防の部分崩落 (土塊で落下)	14:42
堤防の部分崩落 (土塊で落下)	14:46
FEP 管露呈、浮上開始	15:00

堤防の状態を写真 11～写真 21 に示す。堤防の状態の変化の時刻は、撮影した動画の画像から判断した。

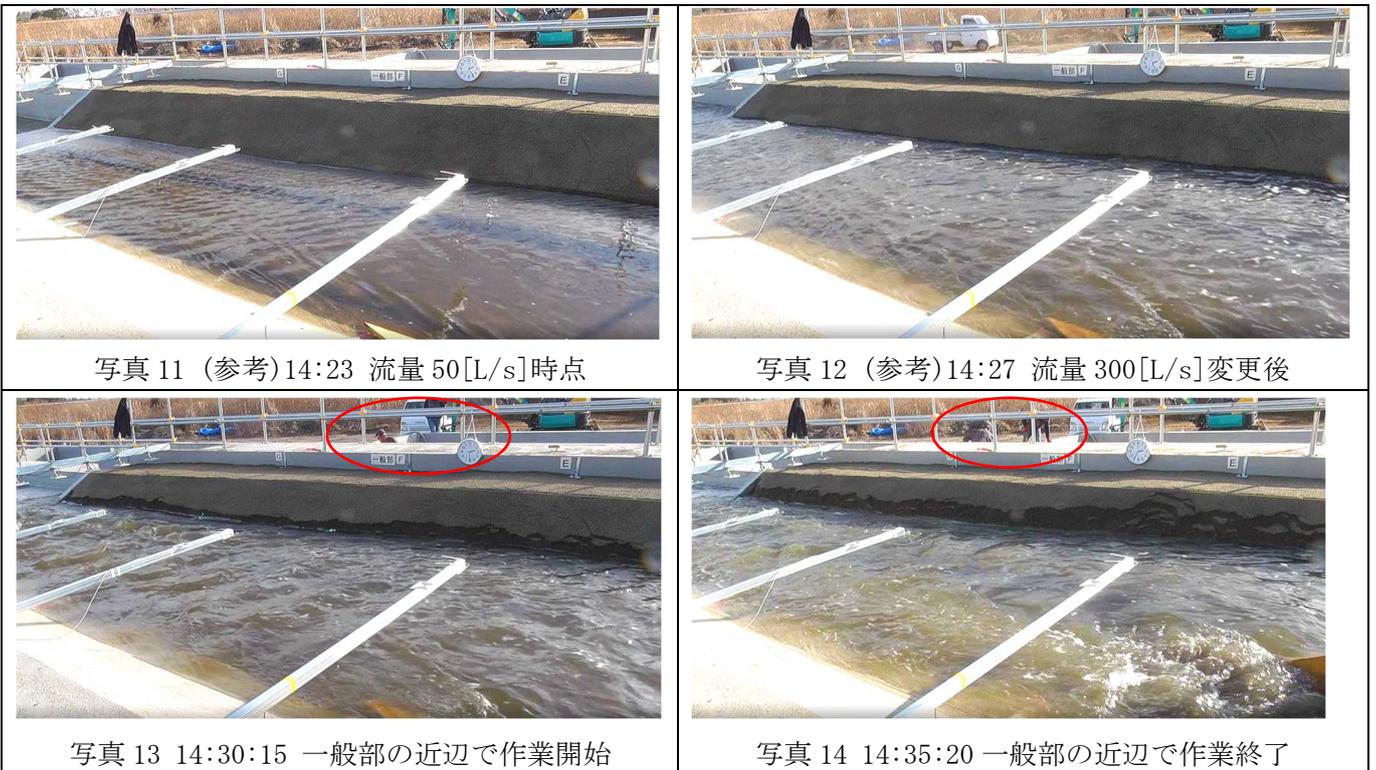




写真 15 14:38:27 堤防の部分崩落(土塊で落下)前



写真 16 14:38:35 堤防の部分崩落(土塊で落下)後



写真 17 14:42:40 堤防の部分崩落(土塊で落下)前



写真 18 14:42:50 堤防の部分崩落(土塊で落下)後



写真 19 14:46:00 堤防の部分崩落(土塊で落下)前



写真 20 14:46:10 堤防の部分崩落(土塊で落下)後



(参考) 写真 19 の拡大



(参考) 写真 20 の拡大



写真 21 15:00 FEP 管露呈、浮上開始

堤防の橋台部の状態と、状態に変化が発生した時刻を表 14 に示す。

表 14 橋台部の状態変化と時刻

堤防の状態	時刻
注水開始 (流量 50L/s)	14:10
水位上昇開始	14:19
流量変更 (300L/s)	14:26
流量変更 (400L/s)	14:35
堤防の上部 (水位より上部) の欠損開始	14:47
水制(板)設置	15:06
堤防の部分崩落 (土塊で落下)	15:17
堤防の継続的な部分崩落 (土塊で落下) 開始	15:20
FEP 管露呈、浮上開始	15:25

堤防の状態を写真 22～写真 30 に示す。堤防の状態の変化の時刻は、撮影した動画の画像から判断した。



写真 22 (参考)14:23 流量 50[L/s]時点



写真 23 (参考)14:27 流量 300[L/s]変更後



写真 24 14:47:00 堤防の上部 (水位より上部) の欠損開始前



写真 25 14:48:00 堤防の上部 (水位より上部) の欠損開始後



写真 26 15:17:20 堤防の部分崩落(土塊で落下)前



写真 27 15:17:30 堤防の部分崩落(土塊で落下)後



写真 28 15:18:00 堤防の継続的な部分崩落(土塊で落下)開始前



写真 29 15:19:00 堤防の継続的な部分崩落(土塊で落下)開始後



写真 30 15:25 FEP 管露呈後浮上開始

橋台・護岸部の堤防の状態変化と、状態に変化が発生した時刻を表 15 に示す。

表 15 橋台・護岸部の状態変化と時刻

堤防の状態	時刻
注水開始 (流量 50L/s)	14:10
水位上昇開始	14:19
流量変更 (300L/s)	14:26
護岸タイトルの落下開始	14:34
流量変更 (400L/s)	14:35
堤防の部分崩落 (土塊で落下)	15:27
流量変更 (650L/s)	15:33
堤防の継続的な部分崩落 (土塊で落下) 開始	15:34
水制(板)設置	15:35
FEP 管露呈後浮上開始	15:41

堤防の状態を写真 31～写真 40 示す。堤防の状態の変化の時刻は、撮影した動画の画像から判断した。



写真 31 (参考)14:23 流量 50[L/s]時点



写真 32 (参考)14:27 流量 300[L/s]変更後



写真 33 14:34:05 護岸タイトルの落下前



写真 34 14:34:45 護岸タイトルの落下後



写真 35 15:26:10 堤防の部分崩落(土塊で落下)前



写真 36 15:26:35 堤防の部分崩落(土塊で落下)後



写真 37 15:33:10 堤防の継続的な部分崩落(土塊で落下)開始前



写真 38 15:33:40 堤防の継続的な部分崩落(土塊で落下)開始



写真 39 (参考)15:36:30 堤防の継続的な部分崩落中



写真 40 15:40:20 FEP 管露呈後浮上開始

3-2-1-2. 水位

一般部、橋台部、橋台・護岸部の水位の測定結果を図 13、図 14、図 15 に示す。

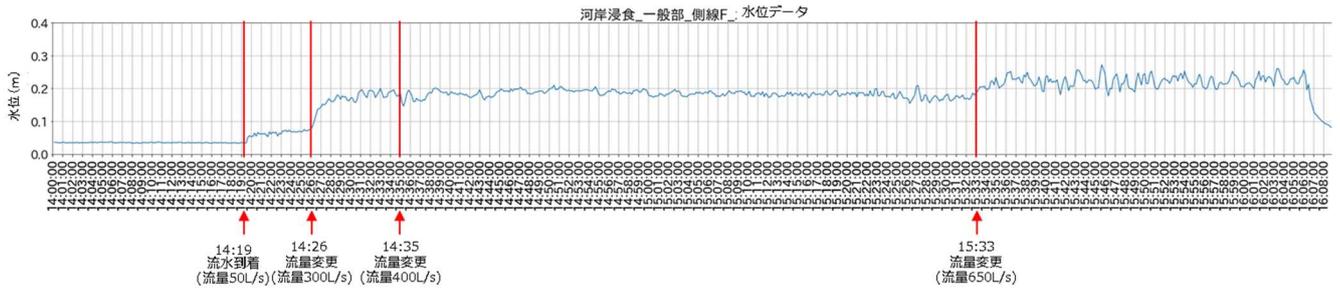


図 13 河岸侵食実験 一般部の水位測定結果

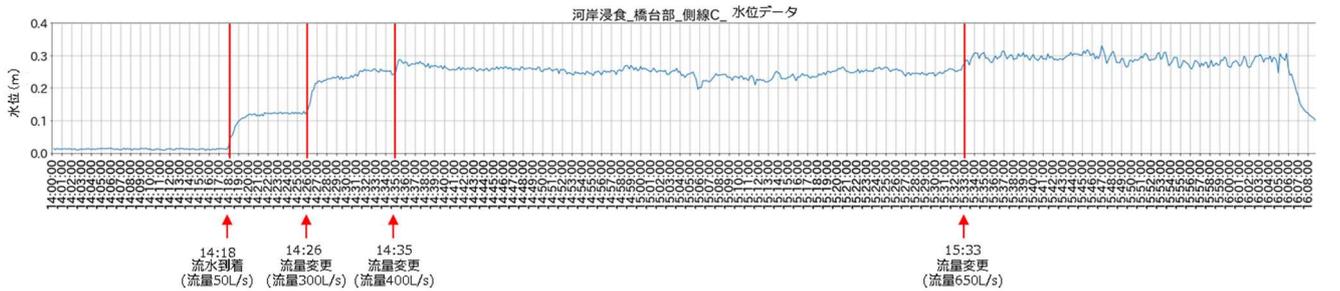


図 14 河岸侵食実験 橋台部の水位測定結果

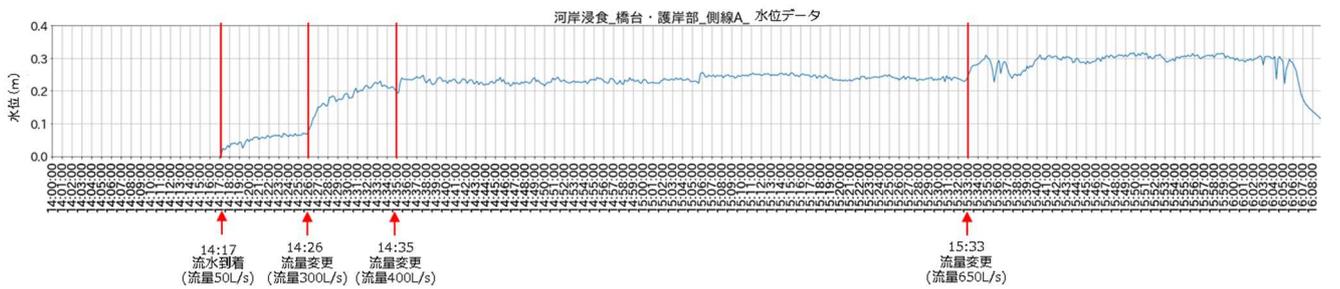


図 15 河岸侵食実験 橋台・護岸部の水位の測定結果

3-2-1-3. 振動

振動の測定結果を図 16 に示す。実験河川下流端から上流端までの 230.0~260.2m 区間を抜粋する。

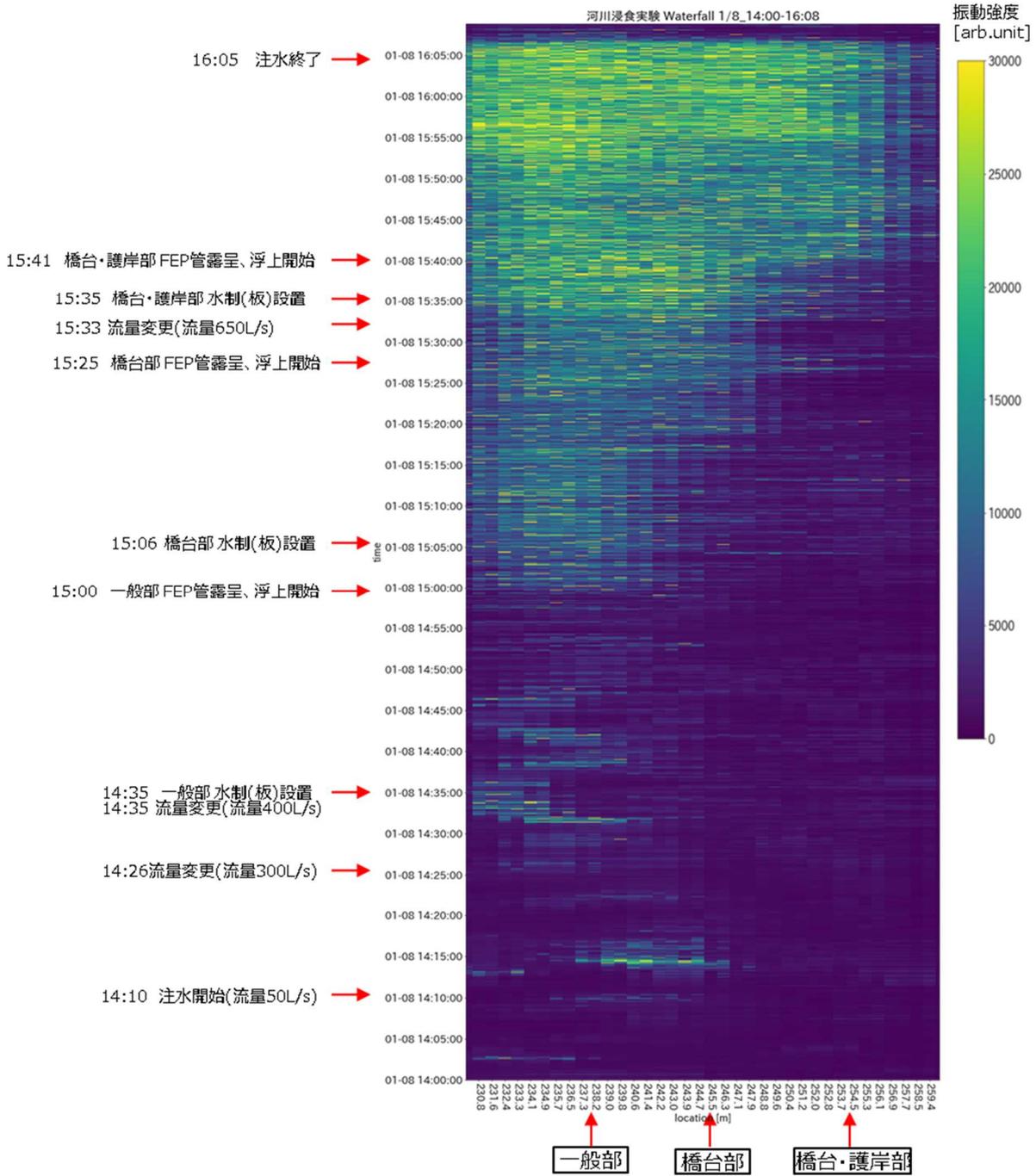


図 16 河岸侵食実験 振動の測定結果

3-2-2. 振動強度による実験結果

3-2-2-1. 一般部

河岸侵食実験における一般部の振動強度の時間変化を図 17 に示す。1 分ごとの振動強度を表 16 に示す。いずれも値は、測定値を 1 分の移動平均で算出した値である。

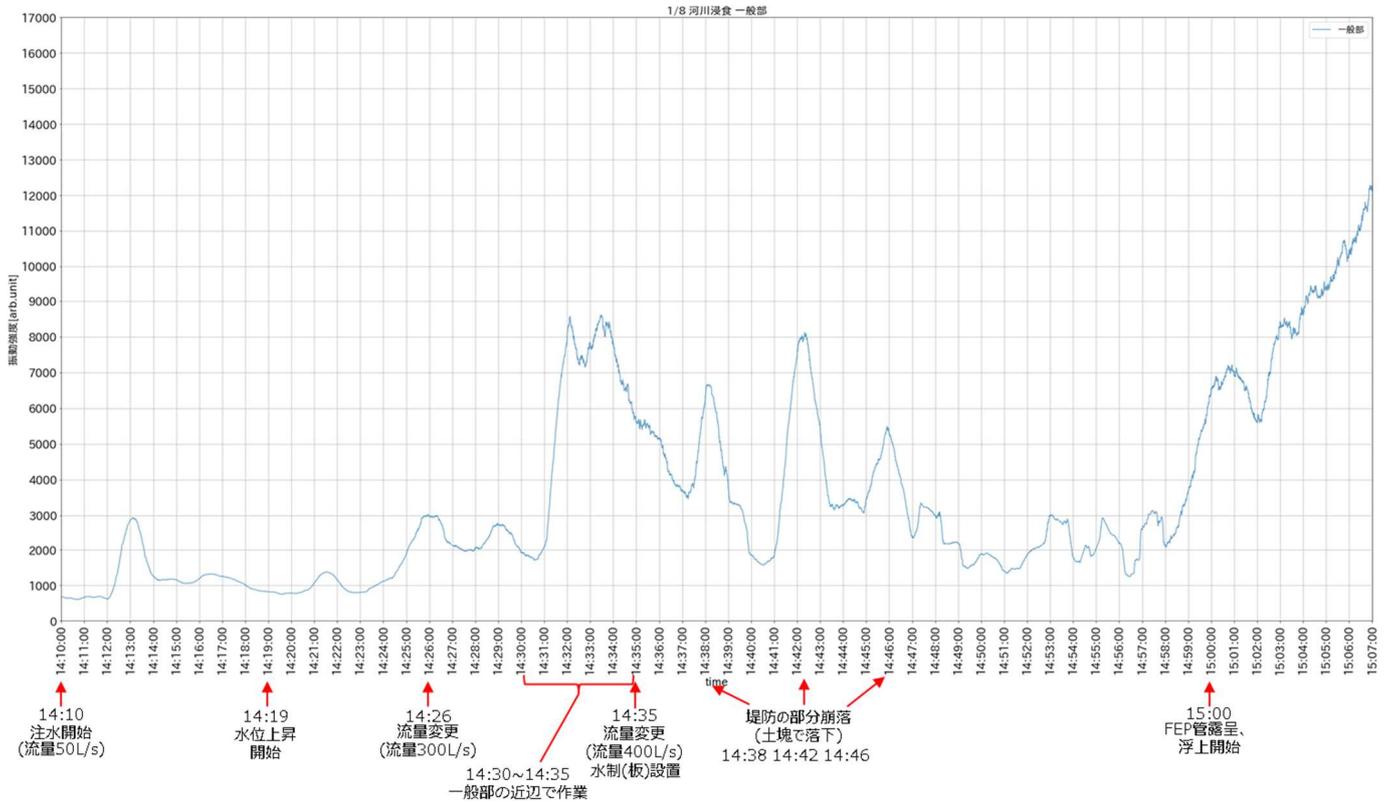


図 17 河岸侵食実験における一般部の振動強度

表 16 河岸侵食実験における一般部の振動強度 (1分ごと)

時刻	振動強度 (arb.)	堤防の 状態	時刻	振動強度 (arb.)	堤防の 状態	時刻	振動強度 (arb.)	堤防の 状態
14:10	690	14:10	14:30	1920		14:50	1920	
14:11	663	注水開始	14:31	2087	14:35	14:51	2087	
14:12	628	流量	14:32	8047	流量変更	14:52	8047	
14:13	2865	50L/s	14:33	7709	400L/s・	14:53	7709	
14:14	1256		14:34	7820	水制(板)	14:54	7820	
14:15	1159		14:35	5615	設置	14:55	5615	
14:16	1192		14:36	5164		14:56	5164	
14:17	1255		14:37	3682	14:38	14:57	3682	
14:18	1019		14:38	6213	部分崩落	14:58	6213	
14:19	824	14:19	14:39	3885		14:59	3885	
14:20	786	着水	14:40	1853		15:00	6517	15:00
14:21	1070		14:41	1841		15:01	6917	FEP 管露呈
14:22	1157		14:42	7564	14:42	15:02	5603	・浮上開始
14:23	805		14:43	5382	部分崩落	15:03	8406	
14:24	1119		14:44	3258		15:04	8624	
14:25	1874	14:26	14:45	3448		15:05	9393	
14:26	2983	流量変更	14:46	5279	14:46	15:06	10460	
14:27	2149	300L/s	14:47	2397	部分崩落	15:07	12136	
14:28	2051		14:48	2989				
14:29	2749		14:49	2225				

※14:13 に振動強度 2865 を検知したが、瞬時であるため周辺環境の振動と判断し除外する。

14:30～14:36 は、周辺で作業があり環境振動の影響を受けているため実験から除外する。

河岸侵食実験における一般部の振動強度で、水位・流量の変化及び侵食の検知、堤防の欠損の検知の2項目を実験した。実験結果を表17に示す。

振動強度による水位・流量の変化及び侵食の検知について、水位・流量の変化に伴う振動強度の変化を観察した。流量50L/sでは振動強度が786～1070 arb.、流量300L/sは2051～2984 arb.、流量400L/s及び水制(板)設置は3682～6813 arb.であり、水位・流量の増加に伴い振動強度が強まることが確認できた。

振動強度による堤防の欠損の検知について、堤防の欠損の進行に伴う振動強度の変化を観察した。軽微な侵食は振動強度が2225～2989 arb.、土塊が落下する部分崩落は5279～7564 arb.であり、堤防の欠損が進行し堤防上部(水位より上側)の堤防の砂がさらさらと落下しながら欠損していく状態から、堤防上部の土塊が落下する部分崩落に至ると、明確に振動強度が強まることが確認できた。

また、FEP管が露呈・浮上(開始)時は6517 arb.、3分経過後は8406 arb.、6分経過後は10406 arb.であり、堤防の欠損によりFEP管が露呈し水面に浮上すると振動強度が明確に強まることが確認できた。また、FEP管に直接接する堤防の欠損では、欠損の進行度合いに伴い振動強度が強まることが確認できた。

表17 河岸侵食実験における一般部の振動強度による実験結果

観測対象	観測手法	堤防の状態	振動強度 (arb.)
水位・流量の変化及び侵食の検知	水位・流量の変化に伴う振動強度の変化	流量50L/s(着水後3分間)	786～1070
		流量300L/s(流量変更後3分間)	2051～2984
		流量400L/s及び水制(板)設置(変更後3分間)※1	3682～6813
堤防の欠損の検知	堤防の欠損の進行に伴う振動強度の変化	軽微の侵食(3分間)※2	2225～2989
		部分崩落(土塊で落下)(3回発生)	5279～7564
		FEP管露呈・浮上(開始時)	6517
		FEP管露呈・浮上(3分経過後)	8406
		FEP管露呈・浮上(6分経過後)	10406

※1 流量変更時点で周辺環境の振動の影響を受けていたため、影響が無くなってから3分間の値とする。

※2 3回目の部分崩落後の3分間の値とする。

軽微の侵食とは、水面下の侵食および、堤防上部(水位より上側)の堤防の砂がさらさらと落下しながら欠損していく状態を示す。

3-2-2-2. 橋台部

河岸侵食実験における橋台部の振動強度の時間変化を図 18 に示す。1 分ごとの振動強度を表 18 に示す。いずれも値は、測定値を 1 分の移動平均で算出した値である。

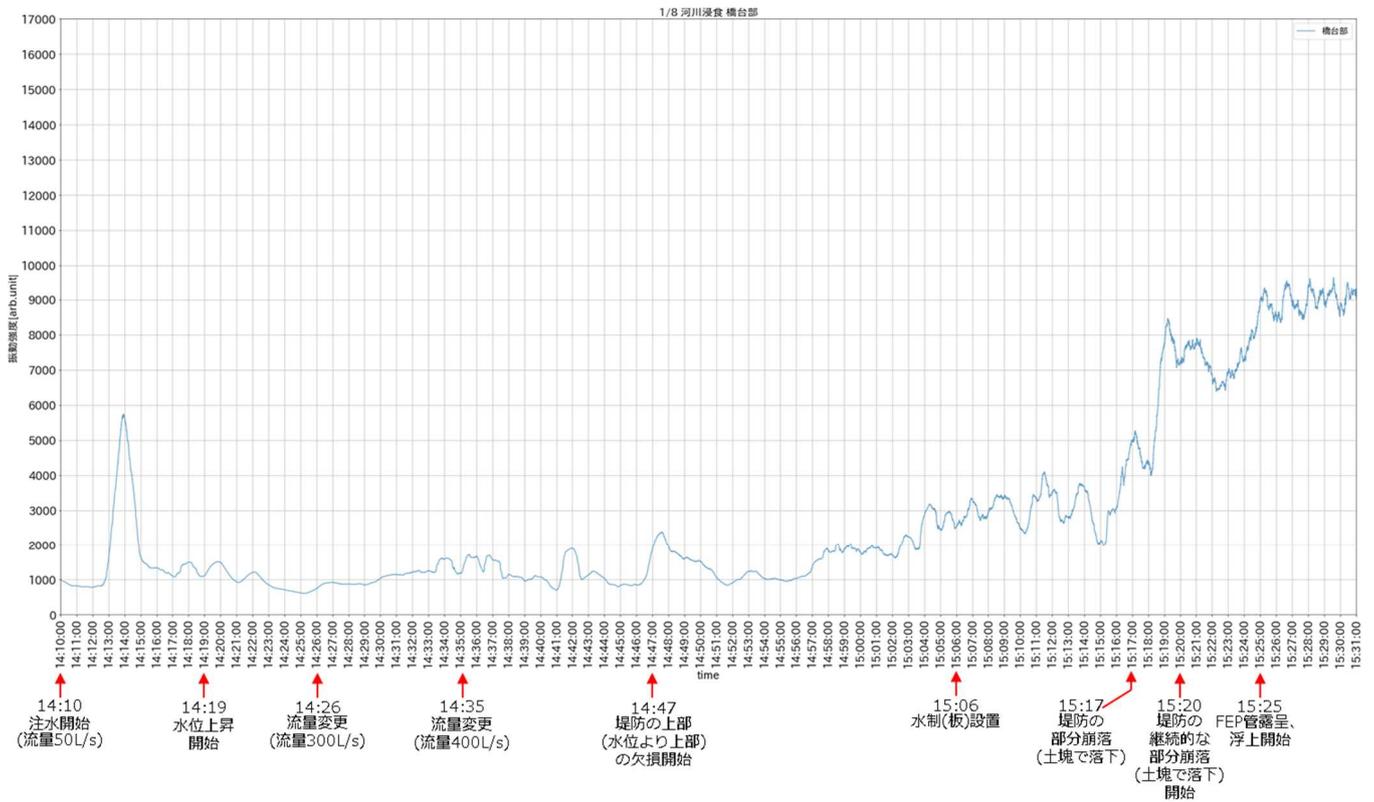


図 18 河岸侵食実験における橋台部の振動強度

表 18 河岸侵食実験における橋台部の振動強度 (1分ごと)

時刻	振動強度 (arb.)	堤防の 状態	時刻	振動強度 (arb.)	堤防の 状態	時刻	振動強度 (arb.)	堤防の 状態
14:10	996	14:10	14:40	1078	14:47 堤防上部 欠損開始	15:10	2484	15:17 部分崩落 15:19 継続部分 崩落開始 15:24 FEP 管露呈 ・浮上開始
14:11	822	注水開始	14:41	698		15:11	3352	
14:12	782	流量	14:42	1898		15:12	3517	
14:13	1568	50L/s	14:43	1133		15:13	2783	
14:14	5660	14:19 着水	14:44	1035		15:14	3678	
14:15	1662		14:45	832		15:15	2051	
14:16	1331		14:46	844		15:16	3043	
14:17	1107		14:47	1859		15:17	4962	
14:18	1494		14:48	1965		15:18	4396	
14:19	1113		14:49	1600		15:19	7722	
14:20	1487		14:50	1516		15:20	7211	
14:21	938		14:51	1072		15:21	7690	
14:22	1199		14:52	903		15:22	6859	
14:23	857		14:53	1234		15:23	6905	
14:24	710	14:54	1033	15:24		7314		
14:25	625	14:26 流量変更	14:55	994		15:25	8950	
14:26	741	300L/s	14:56	1032		15:26	8533	
14:27	922	14:35 流量変更	14:57	1366		15:27	8928	
14:28	873		14:58	1830		15:28	9370	
14:29	848		14:59	1883	15:29	8927		
14:30	1040		15:00	1778	15:30	8731		
14:31	1145		15:01	1889	15:31	9119		
14:32	1209		15:02	1700				
14:33	1256		15:03	2253				
14:34	1587		15:04	2841				
14:35	1178		15:05	2457				
14:36	1659		15:06 水制(板) 設置	15:06	2536			
14:37	1571	15:07	3322					
14:38	1146	15:08	2916					
14:39	957	15:09	3379					

※14:14 に振動強度 5660 を検知したが、瞬時であるため周辺環境の振動と判断し除外する。

河岸侵食実験における橋台部の振動強度で、水位・流量の変化及び侵食の検知、堤防の欠損の検知の2項目を実験した。実験結果を表19に示す。

振動強度による水位・流量の変化及び侵食の検知について、水位・流量の変化に伴う振動強度の変化を観察した。流量50L/sでは振動強度が938~1487 arb.、流量300L/sは741~922 arb.、流量400L/sは1178~1659 arb.であり、水位・流量の増加に伴う有意な変化は確認できなかった。

振動強度による堤防の欠損の検知について、堤防の欠損の進行に伴う振動強度の変化を観察した。軽微の侵食（堤防上部欠損無し）は振動強度が1178~1659 arb.、軽微の侵食（堤防上部欠損有り）は1178~1659 arb.、部分崩落（土塊で落下）は4962 arb.、部分崩落継続は7211~7690 arb.であり、堤防上部は欠損しない状態から、堤防の砂がさらさらと落下しながら欠損していく状態、堤防上部の土塊が落下する部分崩落、部分崩落が継続する状態に至るまで、欠損の進行に伴い振動強度が強くなることが確認できた。特に部分崩落が始まると明確に振動強度が強まることが確認できた。

また、FEP管が露呈・浮上（開始）時は7314 arb.、3分経過後は8928 arb.、6分経過後は8731 arb.であり、堤防の欠損によりFEP管が露呈し水面に浮上すると振動強度が強まることが確認できた。また、FEP管の露呈度合いの進行に伴う振動強度には有意な差はみられなかった。

表19 河岸侵食実験における橋台部の振動強度による実験結果

観測対象	観測手法	堤防の状態	振動強度 (arb.)
水位・流量の変化及び侵食の検知	水位・流量の変化に伴う振動強度の変化	流量50L/s（着水後3分間）	938~1487
		流量300L/s（流量変更後3分間）	741~922
		流量400L/s（流量変更後3分間）	1178~1659
堤防の欠損の検知	堤防の欠損の進行に伴う振動強度の変化	軽微の侵食（堤防上部欠損無し）（3分間）	1178~1659
		軽微の侵食（堤防上部欠損有り）（開始後3分間）	1600~1965
		部分崩落（土塊で落下）（1回発生）	4962
		部分崩落継続（開始後3分間）	7211~7690
		FEP管露呈・浮上（開始時）	7314
		FEP管露呈・浮上（3分経過後）	8928
		FEP管露呈・浮上（6分経過後）	8731

※軽微の侵食（堤防上部欠損有り）とは、水面下の侵食および、堤防上部（水位より上側）の堤防の砂がさらさらと落下しながら欠損していく状態を示す。軽微の侵食（堤防上部欠損無し）とは、水面下の侵食のみ、堤防上部は欠損していない状態を示す。

3-2-2-3. 橋台・護岸部

河岸侵食実験における橋台・護岸部の振動強度の時間変化を図 19 に示す。1 分ごとの振動強度を表 20 に示す。いずれも値は、測定値を 1 分の移動平均で算出した値である。

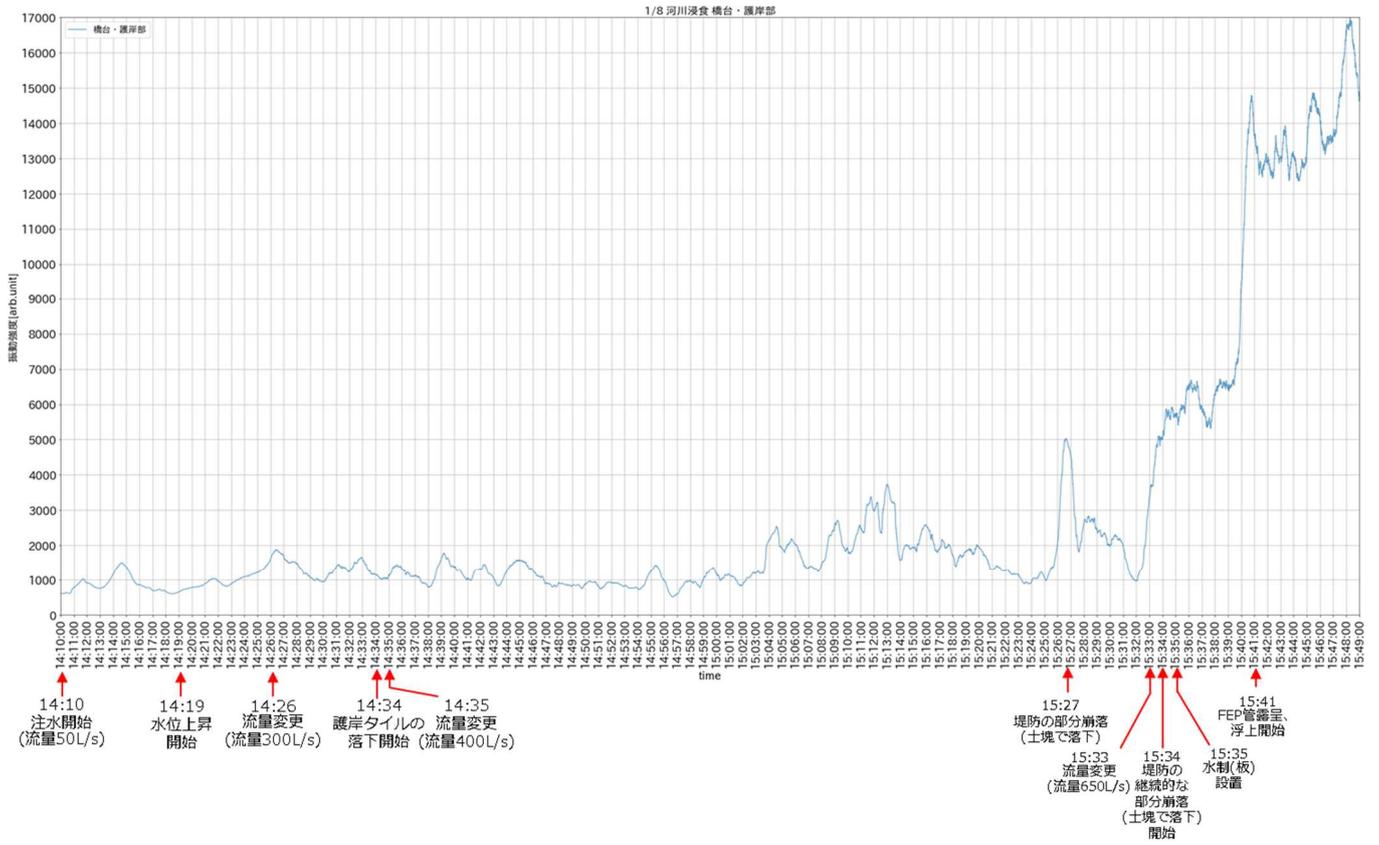


図 19 河岸侵食実験における橋台・護岸部の振動強度

表 20 河岸侵食実験における橋台・護岸部の振動強度（1分ごと）

時刻	振動強度 (arb.)	堤防の 状態	時刻	振動強度 (arb.)	堤防の 状態	時刻	振動強度 (arb.)	堤防の 状態
14:10	610	14:10	14:45	1558		15:20	1961	
14:11	775	注水開始	14:46	1291		15:21	1305	
14:12	916	流量	14:47	899		15:22	1271	
14:13	764	50L/s	14:48	913		15:23	1157	
14:14	1166		14:49	829		15:24	927	
14:15	1392		14:50	879		15:25	1059	
14:16	863		14:51	815		15:26	2086	
14:17	698		14:52	914		15:27	4539	15:27
14:18	676		14:53	833		15:28	2636	部分崩落
14:19	655	14:19	14:54	746		15:29	2468	
14:20	775	着水	14:55	1269		15:30	1981	
14:21	897		14:56	967		15:31	1978	
14:22	956		14:57	589		15:32	973	15:34
14:23	885		14:58	976		15:33	3372	継続的
14:24	1084		14:59	1036		15:34	5007	部分崩落
14:25	1221		15:00	1172		15:35	5713	開始
14:26	1595	14:26	15:01	1136		15:36	6474	
14:27	1696	流量変更	15:02	862		15:37	5950	15:35
14:28	1486	300L/s	15:03	1209		15:38	6301	水制(板)
14:29	1086		15:04	2144		15:39	6429	設置
14:30	941		15:05	1909		15:40	9392	
14:31	1367		15:06	2036		15:41	13690	15:41
14:32	1261	14:34	15:07	1360		15:42	12871	FEP管露呈
14:33	1620	護岸	15:08	1434		15:43	13065	・浮上開始
14:34	1145	タイル	15:09	2538		15:44	13046	
14:35	1125	落下開始	15:10	1890		15:45	13256	
14:36	1322		15:11	2491		15:46	14198	
14:37	1130	14:35	15:12	2986		15:47	13602	
14:38	798	流量変更	15:13	3724		15:48	16505	
14:39	1595	400L/s	15:14	1579		15:49	14677	
14:40	1380		15:15	1922				
14:41	1035		15:16	2568				
14:42	1322		15:17	1893				
14:43	1052		15:18	1731				
14:44	1246		15:19	1818				

河岸侵食実験における橋台・護岸部の振動強度で、水位・流量の変化及び侵食の検知、堤防の欠損の検知の2項目を実験した。実験結果を表21に示す。

振動強度による水位・流量の変化及び侵食の検知について、水位・流量の変化に伴う振動強度の変化を観察した。流量50L/sでは振動強度が655～897 arb.、流量300L/sは1486～1696 arb.、流量400L/sは1125～1322 arb.であり、水位・流量の増加に伴い振動強度が強まることが確認できた。

振動強度による堤防の欠損の検知について、堤防の欠損の進行に伴う振動強度の変化を観察した。軽微の侵食（護岸タイル落下）は振動強度が1125～1322 arb.、部分崩落（土塊で落下）は4539 arb.、部分崩落継続は5007～6474 arb.であり、堤防の砂がさらさらと落下しながら護岸タイルが落下し欠損していく状態、堤防上部の土塊が落下する部分崩落、部分崩落が継続する状態に至るまで、欠損の進行に伴い振動強度が強まることが確認できた。特に部分崩落が始まると明確に振動強度が強まることが確認できた。

また、FEP管が露呈・浮上（開始）時は13690 arb.、3分経過後は13046 arb.、6分経過後は13602 arb.であり、堤防の欠損によりFEP管が露呈し水面に浮上すると振動強度が明確に強まることが確認できた。また、FEP管の露呈度合いの進行に伴う振動強度には有意な差はみられなかった。

表 21 河岸侵食実験における橋台・護岸部の振動強度による実験結果

観測対象	観測手法	堤防の状態	振動強度 (arb.)
水位・流量の変化及び侵食の検知	水位・流量の変化に伴う振動強度の変化	流量 50L/s (着水後 3 分間)	655～897
		流量 300L/s (流量変更後 3 分間)	1486～1696
		流量 400L/s (流量変更後 3 分間)	1125～1322
堤防の欠損の検知	堤防の欠損の進行に伴う振動強度の変化	軽微の侵食（護岸タイル落下）（開始後 3 分間）	1125～1322
		部分崩落（土塊で落下）（1 回発生）	4539
		部分崩落継続（開始後 3 分間）	5007～6474
		FEP 管露呈・浮上（開始時）	13690
		FEP 管露呈・浮上（3 分経過後）	13046
		FEP 管露呈・浮上（6 分経過後）	13602

※軽微の侵食（護岸タイル落下）とは、水面下の侵食および、堤防上部（水位より上側）の堤防の砂がさらさらと落下しながら欠損し、護岸タイルが1枚ごとに落下する場合を含む状態を示す。

3-2-3. 周波数特性による実験結果

3-2-3-1. 一般部

河岸侵食実験における一般部の周波数特性 0-700Hz の時間変化を図 20 に、0-100Hz の時間変化を図 21 に示す。1 分ごとの信号成分の強さが 15.0 以上の周波数範囲を表 22 に示す。

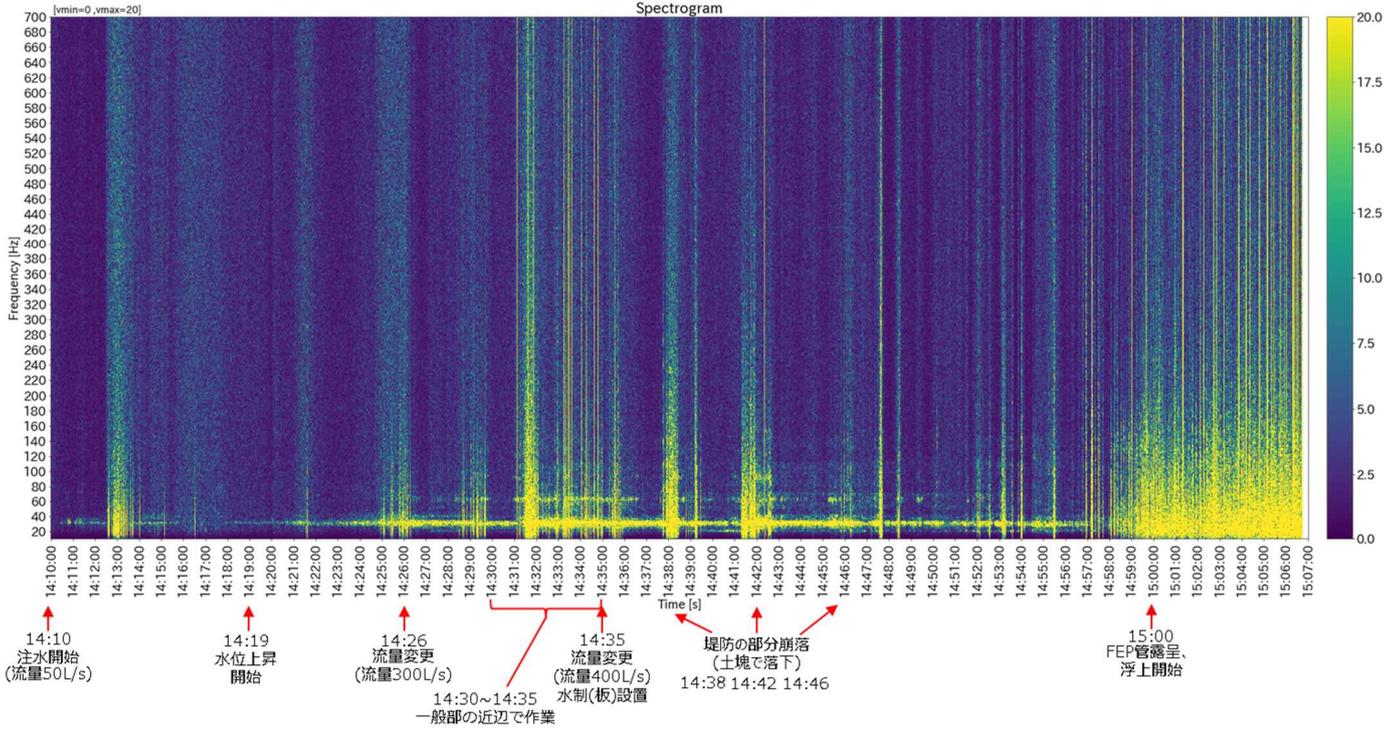


図 20 河岸侵食実験における一般部の周波数特性(10-700Hz)

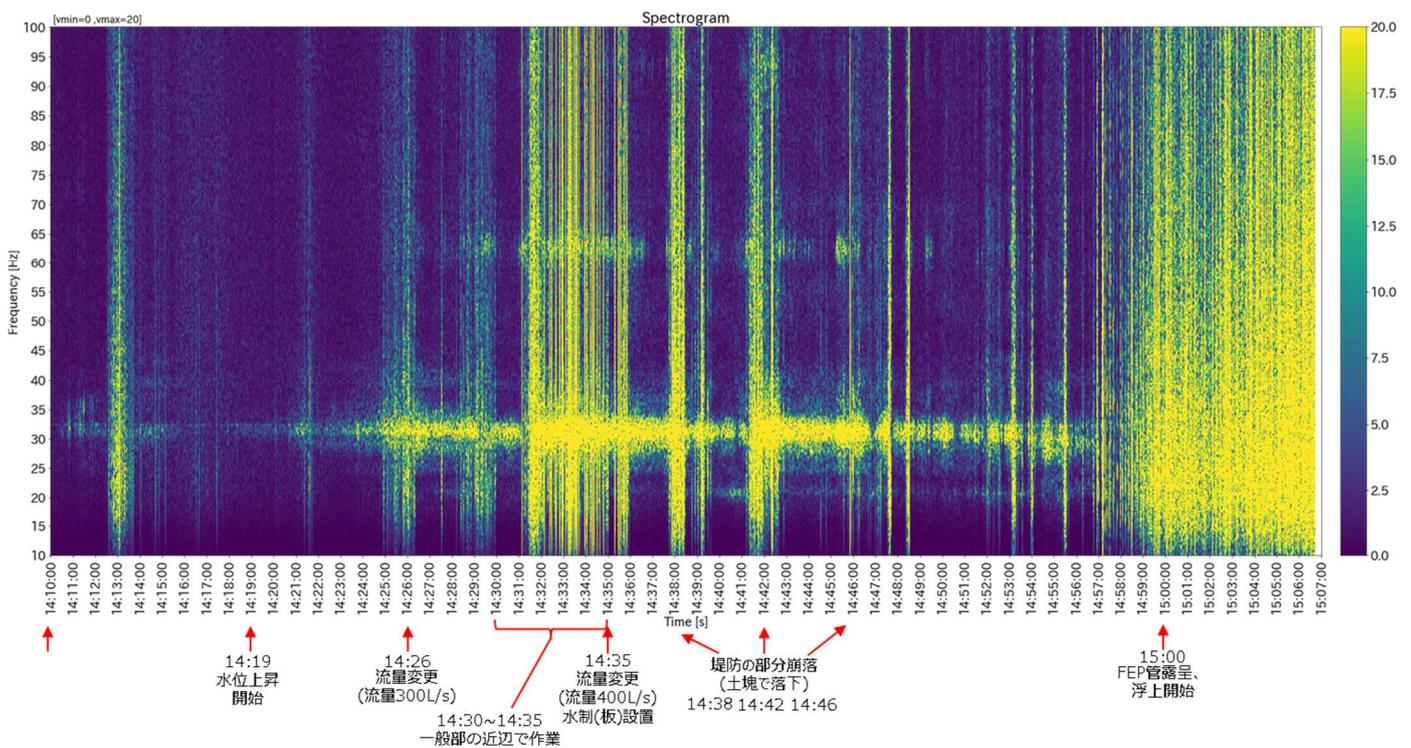


図 21 河岸侵食実験における一般部の周波数特性(10-100Hz)

表 22 河岸侵食実験における一般部の周波数特性 (1分ごと)

時刻	周波数 範囲 (Hz)	堤防の 状態	時刻	周波数 範囲 (Hz)	堤防の 状態	時刻	周波数 範囲 (Hz)	堤防の 状態
14:10	32	14:10 注水開 始 流量 50L/s	14:30	30~35	14:35 流量変更 400L/s・ 水制(板) 設置 14:38 部分崩落 14:42 部分崩落 14:46 部分崩落	14:50	30~35	15:00 FEP 管露呈 ・ 浮上開始
14:11			14:31			14:51		
14:12			14:32	14:52				
14:13			断続的に 10~700 超	14:53		10~700 超		
14:14				14:34		14:54	30~35	
14:15				14:35		14:55	10~700 超	
14:16			14:36	30~35 60~65		14:56	30~35	
14:17			14:37			14:57	10~700 超	
14:18			14:38	14:58				
14:19			30~35	14:59				
14:20				15:00				
14:21			10~700 超	15:01				
14:22	15:02							
14:23	30~35	30~35 60~65	15:03					
14:24			15:04					
14:25	10~700 超	30~35	15:05					
14:26			15:06					
14:27	30~35	10~700 超	15:07					
14:28			14:48					
14:29	10~700 超	30~35						

※周波数範囲の値は周波数特性の図を目視で確認した値を示す。

14:30~14:36 は、周辺で作業があり環境振動の影響を受けているため実験から除外する。

河岸侵食実験における一般部の周波数特性で、水位・流量の測定、侵食による堤防の欠損の検知の2項目を実験した。実験結果を表23に示す。

周波数特性による水位・流量の変化及び侵食の検知について、水位・流量の変化に伴う周波数ごとの信号成分の強さの変化を観察した。流量50L/sは32Hz、流量300L/sは30～35Hz まれに10～700Hz超、流量400L/s及び水制(板)設置は30～35Hz まれに10～700Hz超の周波数範囲で信号成分を強く検出しており、水位・流量の増加に伴い10～700Hz超に周波数範囲が広まることが確認できた。

周波数特性による堤防の欠損の検知について、堤防の欠損の進行に伴う周波数ごとの信号成分の強さの変化を観察した。軽微な侵食は30～35Hz まれに10～700Hz超、土塊が落下する部分崩落は10～700Hz超の周波数範囲で信号成分を強く検出しており、堤防上部の土塊が落下する部分崩落に至ると、明確に周波数範囲が10～700Hz超に広まることが確認できた。また、FEP管が露呈・浮上(開始)時、3分経過後、6分経過後いずれも10～700Hz超の周波数範囲であり、堤防の欠損によりFEP管が露呈し水面に浮上すると周波数範囲が10～700Hz超に広まることが確認できた。

表23 河岸侵食実験における一般部の周波数特性による実験結果

観測対象	観測手法	堤防の状態	周波数範囲(Hz)
水位・流量の測定	水位・流量の変化に伴う周波数特性の変化	流量50L/s (着水後3分間)	32
		流量300L/s (流量変更後3分間)	30～35 まれに10～700超
		流量400L/s及び水制(板) (流量変更後3分間) ※1	30～35 もしくは10～700超
侵食による堤防の欠損の検知	堤防の欠損の進行に伴う周波数特性の変化	軽微の侵食 (3分間) ※2	30～35 まれに10～700超
		部分崩落(土塊で落下) (3回発生)	10～700超
		FEP管露呈・浮上 (開始時)	10～700超
		FEP管露呈・浮上 (3分経過後)	10～700超
		FEP管露呈・浮上 (6分経過後)	10～700超

※1 流量変更時点で周辺環境の振動の影響を受けていたため、影響が無くなってから3分間の値とする。

※2 3回目の部分崩落後の3分間の値とする。

軽微の侵食とは、水面下の侵食および、堤防上部(水位より上側)の堤防の砂がさらさらと落下しながら欠損していく状態を示す。

3-2-3-2. 橋台部

河岸侵食実験における橋台部の周波数特性の時間変化を図 22 に、0-100Hz の時間変化を図 23 に示す。1 分ごとの信号成分の強さが 15.0 以上の周波数範囲を表 24 に示す。

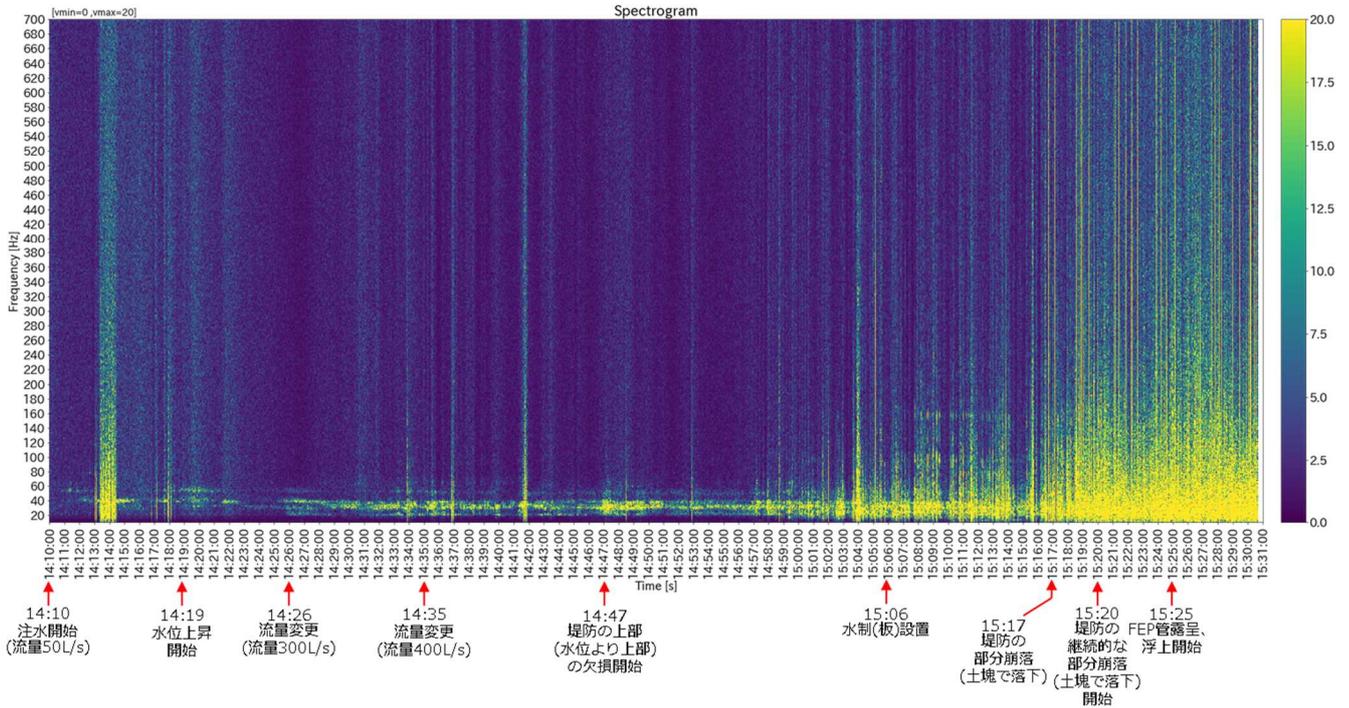


図 22 河岸侵食実験における橋台部の周波数特性 (10-700Hz)

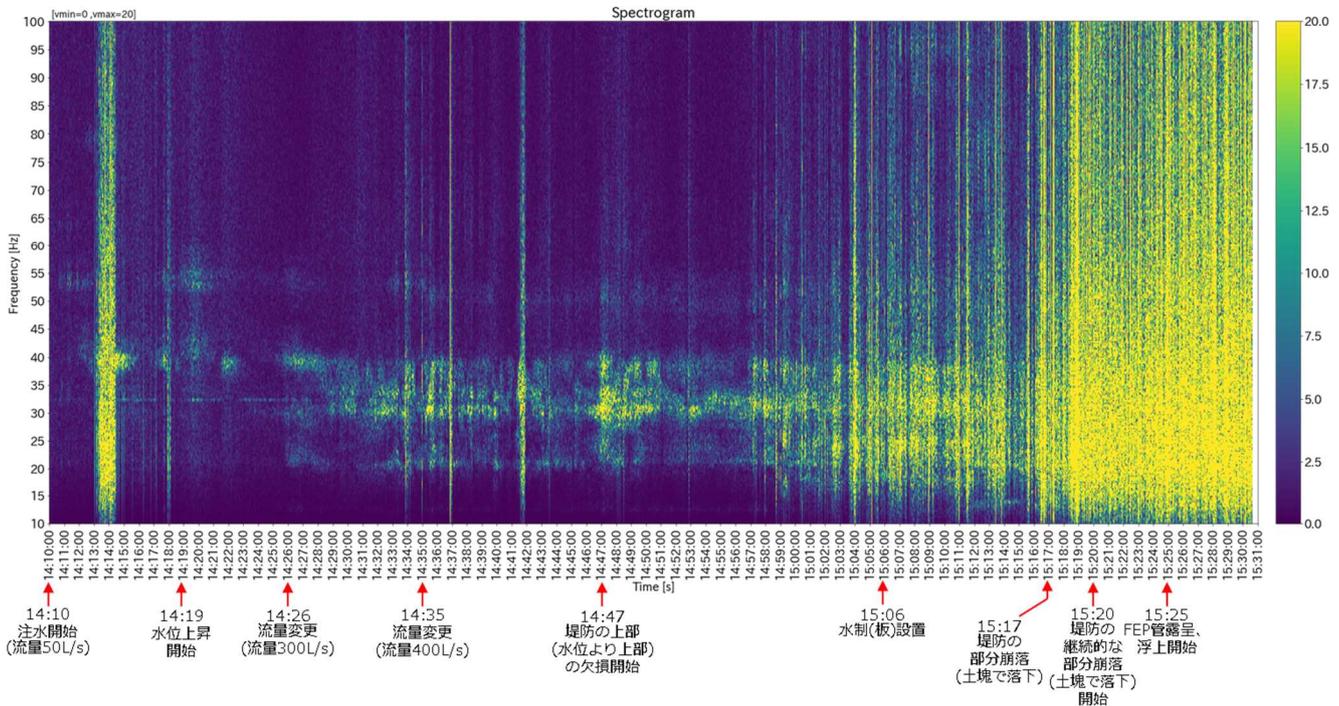


図 23 河岸侵食実験における橋台部の周波数特性 (10-100Hz)

表 24 河岸侵食実験における橋台部の周波数特性 (1分ごと)

時刻	周波数特性(Hz)	堤防の状態	時刻	周波数特性(Hz)	堤防の状態	時刻	周波数特性(Hz)	堤防の状態
14:10	-	14:10 注水開始 流量 50L/s	14:40	20~40	14:47 堤防上部 欠損開始	15:10	断続的に 10~700 超	15:17 部分崩落
14:11	-		14:41	10~700 超		15:11		
14:12	-		14:42	20~40		15:12		
14:13	10~700 超		14:43			15:13		
14:14	40		14:44			15:14		
14:15	-		14:45			15:15		
14:16	-		14:46			15:16		
14:17	-		14:47			15:17		
14:18	40		14:48			15:18		
14:19	-		14:49			15:19 継続部分 崩落開始		
14:20	-	14:50	15:20					
14:21	40	14:51	15:21					
14:22	-	14:52	15:22					
14:23	-	14:53	15:23					
14:24	-	14:54	15:24					
14:25	-	14:55	15:24 FEP 管露 呈 ・浮上開 始	15:25				
14:26	14:26 流量変更 300L/s	14:56		15:26				
14:27		20~40		14:57	15:27			
14:28				14:58	15:28			
14:29				14:59	15:29			
14:30				15:00	15:30			
14:31				15:01	15:31			
14:32				15:02				
14:33				15:03				
14:34				15:04				
14:35		15:05						
14:36	10~700 超	15:06	15:06 水制(板) 設置					
14:37	20~40	15:07						
14:38		15:08						
14:39		15:09						

※周波数範囲の値は周波数特性の図を目視で確認した値を示す。

河岸侵食実験における橋台部の周波数特性で、水位・流量の測定、侵食による堤防の欠損の検知の2項目を実験した。実験結果を表25に示す。

周波数特性による水位・流量の変化及び侵食の検知について、水位・流量の変化に伴う周波数ごとの信号成分の強さの変化を観察した。流量50L/sはまれに40Hz、流量300L/sは20~40Hz、流量400L/s及び水制(板)設置は20~40Hzまれに10~700Hz超の周波数範囲で信号成分を強く検出しており、水位・流量の増加に伴い10~700Hz超に周波数範囲が広まることが確認できた。

周波数特性による堤防の欠損の検知について、堤防の欠損の進行に伴う周波数ごとの信号成分の強さの変化を観察した。堤防の上部の欠損が無い軽微な侵食は20~40Hzまれに10~700Hz超、堤防の上部の欠損が始まってからの3分間は20~40Hz、堤防の上部の欠損が始まってから10分後は断続的に10~700Hz超、土塊が落下する部分崩落は10~700Hz超の周波数範囲で信号成分を強く検出しており、堤防上部の侵食が進むと、周波数範囲が10~700Hz超に広まることが確認できた。また、FEP管が露呈・浮上(開始)時、3分経過後、6分経過後いずれも10~700Hz超の周波数範囲であり、堤防の欠損によりFEP管が露呈し水面に浮上すると周波数範囲が10~700Hz超に広まることが確認できた。

表25 河岸侵食実験における橋台部の周波数特性による実験結果

観測対象	観測手法	堤防の状態	周波数範囲(Hz)
水位・流量の変化及び侵食の検知	水位・流量の変化に伴う周波数特性の変化	流量50L/s (着水後3分間)	まれに40
		流量300L/s (流量変更後3分間)	20~40
		流量400L/s (流量変更後3分間)	20~40 まれに10~700超
侵食による堤防の欠損の検知	堤防の欠損の進行に伴う周波数特性の変化	軽微の侵食(堤防上部欠損無し) (3分間)	20~40 まれに10~700超
		軽微の侵食(堤防上部欠損有り) (開始後3分間)	20~40
		軽微の侵食(堤防上部欠損有り) (開始10分後から3分間)	断続的に10~700超
		部分崩落(土塊で落下) (1回発生)	10~700超
		部分崩落継続 (開始後3分間)	10~700超
		FEP管露呈・浮上(開始時)	10~700超
		FEP管露呈・浮上(3分経過後)	10~700超
		FEP管露呈・浮上(6分経過後)	10~700超

※軽微の侵食(堤防上部欠損有り)とは、水面下の侵食および、堤防上部(水位より上側)の堤防の砂がさらさらと落下しながら欠損していく状態を示す。軽微の侵食(堤防上部欠損無し)とは、水面下の侵食のみ、堤防上部は欠損していない状態を示す。

3-2-3-3. 橋台・護岸部

河岸侵食実験における橋台・護岸部の周波数特性の時間変化を図 24 に、0-100Hz の時間変化を図 25 に示す。1 分ごとの信号成分の強さが 15.0 以上の周波数範囲を表 26 に示す。

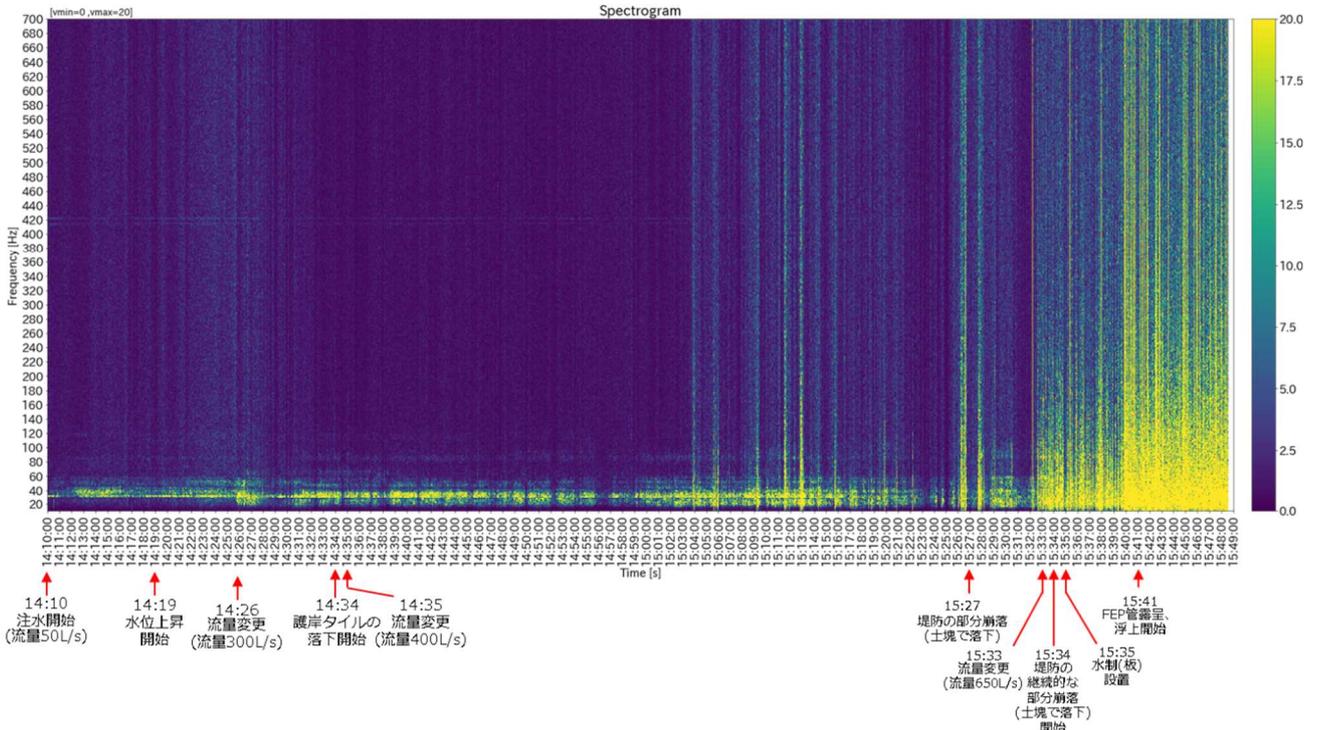


図 24 河岸侵食実験における橋台・護岸部の周波数特性 (10-700Hz)

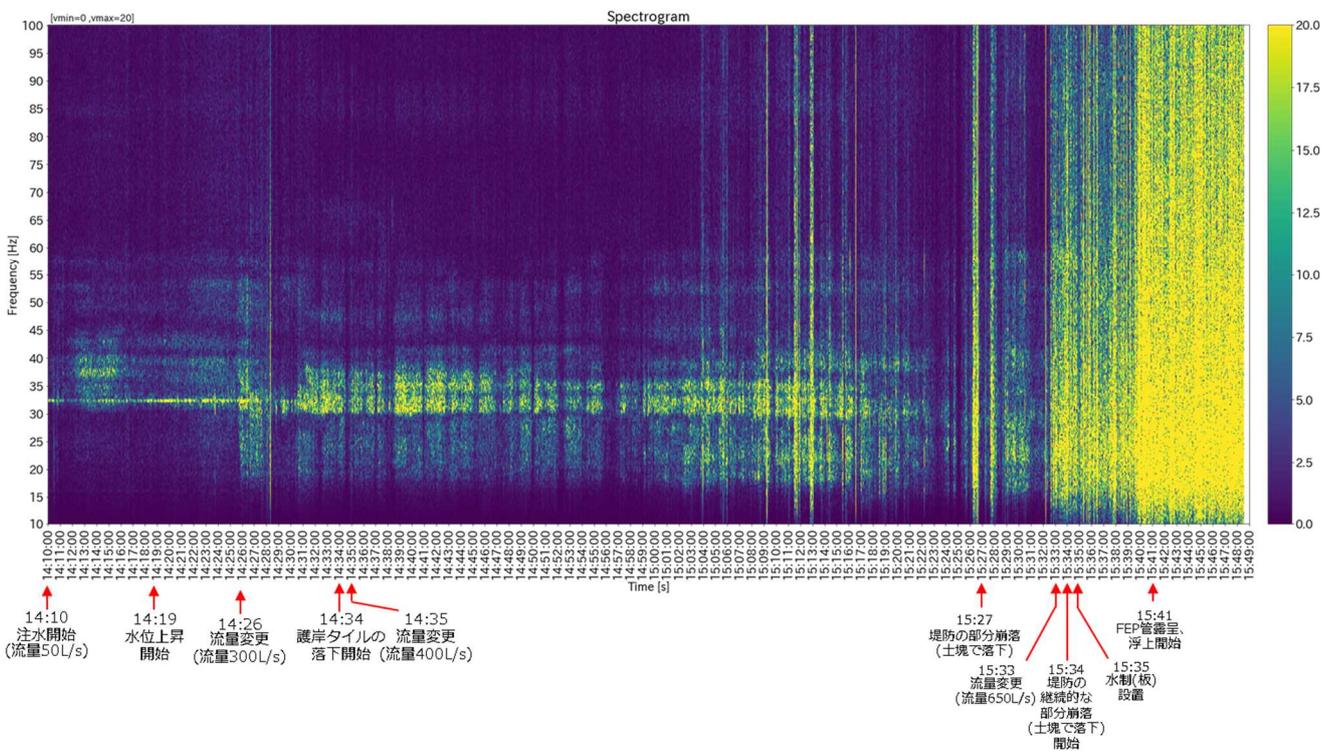


図 25 河岸侵食実験における橋台・護岸部の周波数特性(10-100Hz)

表 26 河岸侵食実験における橋台・護岸部の周波数特性（1分ごと）

時刻	周波数 範囲(Hz)	堤防の 状態	時刻	周波数 範囲(Hz)	堤防の 状態	時刻	周波数 範囲(Hz)	堤防の 状態
14:10	-	14:10	14:45	20~60		15:20	20~60	15:27 部分崩落 15:34 継続的 部分崩落 開始 15:35 水制(板) 設置 15:41 FEP管露 呈 ・浮上開 始
14:11	-	注水開始	14:46			15:21		
14:12	30~60	流量	14:47			15:22		
14:13		50L/s	14:48			15:23		
14:14		14:49	15:24					
14:15		14:50	15:25					
14:16		14:51	15:26			10~700超		
14:17		14:52	15:27			20~60		
14:18		14:53	15:28					
14:19		14:54	15:29					
14:20		14:55	15:30					
14:21		14:56	15:31					
14:22	14:57	15:32	10~700超					
14:23	14:58	15:33						
14:24	14:59	15:34						
14:25	15:00	15:35						
14:26	20~60	15:36						
14:27	10~700超	14:26 流量変更 300[L/s]		15:37				
14:28		15:02		15:38				
14:29	30~60	15:03		10~700超	15:39			
14:30	20~60	14:34 護岸 タイル 落下開始		15:04	20~60	15:40		
14:31				15:05	10~700超	15:41		
14:32			15:06	20~60	15:42			
14:33			15:07	20~60	15:43			
14:34			15:08		15:44			
14:35		14:35 流量変更 400[L/s]	15:09	10~700超	15:45			
14:36			15:10	20~60	15:46			
14:37			15:11	10~700超	15:47			
14:38			15:12	20~60	15:48			
14:39			15:13		15:49			
14:40	20~60	15:14	20~60					
14:41		15:15		10~700超				
14:42		15:16	20~60					
14:43		15:17						
14:44		15:18						
		15:19						

※周波数範囲の値は周波数特性の図を目視で確認した値を示す。

河岸侵食実験における橋台・護岸部の周波数特性で、水位・流量の測定、侵食による堤防の欠損の検知の2項目を実験した。実験結果を表27に示す。

周波数特性による水位・流量の変化及び侵食の検知について、水位・流量の変化に伴う周波数ごとの信号成分の強さの変化を観察した。流量50L/sは30～60Hz、流量300L/sは20～60Hzまれに10～700超、流量400L/s及び水制(板)設置は20～60Hz周波数範囲で信号成分を強く検出しており、水位・流量の増加に伴う有意な周波数特性は確認できなかった。

周波数特性による堤防の欠損の検知について、堤防の欠損の進行に伴う周波数ごとの信号成分の強さの変化を観察した。護岸タイルが落下する軽微の侵食は20～60Hz、土塊が落下する部分崩落は10～700Hz超、部分崩落の継続は10～700Hz超の周波数範囲で信号成分を強く検出しており、堤防上部の侵食が進むと、周波数範囲が10～700Hz超に広まることが確認できた。また、FEP管が露呈・浮上(開始)時、3分経過後、6分経過後いずれも10～700Hz超の周波数範囲であり、堤防の欠損によりFEP管が露呈し水面に浮上すると周波数範囲が10～700Hz超に広まることが確認できた。

表27 河岸侵食実験における橋台・護岸部の周波数特性による実験結果

観測対象	観測手法	堤防の状態	周波数範囲(Hz)
水位・流量の測定	水位・流量の変化に伴う周波数特性の変化	流量50L/s (着水後3分間)	30～60
		流量300L/s (流量変更後3分間)	20～60 まれに10～700超
		流量400L/s (流量変更後3分間)	20～60
侵食による堤防の欠損の検知	堤防の欠損の進行に伴う周波数特性の変化	軽微の侵食(護岸タイル落下) (開始後3分間)	20～60
		部分崩落(土塊で落下) (1回発生)	10～700超
		部分崩落継続 (開始後3分間)	10～700超
		FEP管露呈・浮上 (開始時)	10～700超
		FEP管露呈・浮上 (3分経過後)	10～700超
		FEP管露呈・浮上 (6分経過後)	10～700超

※軽微の侵食(護岸タイル落下)とは、水面下の侵食および、堤防上部(水位より上側)の堤防の砂がさらさらと落下しながら欠損し、護岸タイルが1枚ごとに落下する場合を含む状態を示す。

4. 考察

4-1. 越水検知の可否

4-1-1 振動強度による検知可否

越水実験における周波数特性での、水位の測定、越水の検知、越水による堤防欠損の検知の3項目の実験結果を表 28 に示す。

表 28 越水実験における振動強度による実験結果

観測対象	堤防の状態	振動強度 (arb.)	
		堤内地側	堤外地側
水位の測定	水位 0m (貯水開始直後)	622	533
	水位 1.3m (越水開始直前)	351	330
越水の検知	越水前 (水位 0m~1.3m)	271~741	294~967
	越水開始	1408	1177
	越水範囲の拡大	1884	1840
越水による 堤防欠損の 検知	越水開始	1408	1177
	堤防欠損 (越水から 1 分経過)	1884	1840
	堤防欠損 (越水から 2 分経過)	1729	1829~4530
	堤防欠損 (FEP 管露呈 (露呈開始))	2055	—
	堤防欠損 (FEP 管露呈 (半分露呈))	3201	—
	堤防欠損 (FEP 管露呈 (全て露呈))	5019	—

水位の測定について、水位が減少するにつれて振動強度が弱まる傾向にあるが、実験環境では水位が上がることで注水箇所から貯水槽への水の落差が少なくなるため、注水時の落水の振動強度が減少している可能性が考えられる。実験環境固有の可能性が考えられるため、越水実験における水位の実験結果は除外する。

越水の検知について、越水前は 271~967arb.、越水開始時は 1177~1408 arb. の振動強度である。従って、1200 arb. 以上の振動強度を検知することで越水の開始を検知することが可能と考える。

越水による堤防の欠損の検知について、越水から 1 分以降堤防の欠損が始まっている状態の振動強度は 1729~4530arb. であり、FEP 管が全て露呈したときの振動強度は 5019arb. である。従って、1700arb. 以上の振動強度で越水による堤防の欠損の検知、5000arb. 以上の振動強度で、FEP 管理設置位置以上の堤防の欠損の進行が検知可能と考える。

なお、堤内地側と堤外地側の双方の埋設箇所の光ファイバの測定結果も同様の値を示している。従って堤内地側と堤外地側いずれに埋設した光ファイバを用いても検知は可能と考える

越水実験における振動強度での、水位の測定可否、越水の検知可否、越水による堤防の欠損の検知可否、越水による堤防の欠損量の検知可否の考察結果を表 29 に示す。

表 29 越水実験における振動強度による検知可否

検知対象	光ファイバ埋設位置	検知方法	検知可否
水位の測定	堤内地側、堤外地側	—	—
越水の検知	堤内地側、堤外地側	1200arb. 以上の振動強度の検知	可能
越水による堤防の欠損の検知	堤内地側、堤外地側	1700arb. 以上の振動強度の検知	可能
越水による堤防の欠損量の検知 ※	堤内地側、堤外地側	5000arb. 以上の振動強度の検知	可能

※FEP 管理設位置まで欠損したことを検知する

4-1-2 周波数による検知可否

越水実験における周波数特性での、水位の測定、越水の検知、越水による堤防欠損の検知の3項目の実験結果を表30に示す。

表30 越水実験における周波数特性による実験結果

観測対象	堤防の状態	信号成分の強さが1.0arb.以上の周波数範囲(Hz)	
		堤内地側	堤外地側
水位の測定	水位0m(貯水開始直後)	10~260	10~220
	水位1.3m(越水開始直前)	10~260	10~220
越水の検知	越水前(水位0m~1.3m)	10~260	10~220
	越水開始	10~540	10~580
	越水範囲の拡大	10~540	10~580
越水による堤防欠損の検知	越水開始	10~540	10~580
	堤防欠損(越水から1分経過)	10~540	10~580
	堤防欠損(越水から2分経過)	10~540	10~580
	堤防欠損(FEP管露呈(露呈開始))	10~540	—
	堤防欠損(FEP管露呈(半分露呈))	10~540	—
	堤防欠損(FEP管露呈(全て露呈))	10~540	—

水位の測定について、いずれの水位においても10~200Hz程度の信号成分が強く、水位によって変化しない。従って、周波数特性による水位の測定は困難と考える。

越水の検知について、越水前は10~200Hz程度、越水後は10~500Hz程度の信号成分が強くなっている。堤外地側へ流水する際の流水による振動で高周波側の振動周波数が広まったと考える。従って10~500Hzの信号成分を検知することにより、越水の検知は可能と考える

越水による堤防の欠損の検知について、越水開始以降は堤防の欠損状態に関わらず10~200Hz程度の信号成分を強く検知している。従って、周波数特性による堤防の欠損の検知は困難と考える。

なお、堤内地側と堤外地側の双方の埋設箇所の光ファイバの測定結果も同様の値を示している。従って堤内地側と堤外地側いずれに埋設した光ファイバを用いても越水の検知は可能と考える

越水実験における周波数特性での、水位の測定可否、越水の検知可否、越水による堤防の欠損の検知可否、越水による堤防の欠損量の検知可否の考察結果を表31に示す。

表31 越水実験における周波数特性による検知可否

検知対象	光ファイバ埋設位置	検知方法	検知可否
水位の測定	堤内地側、堤外地側	—	困難
越水の検知	堤内地側、堤外地側	10~500Hzの周波数範囲の振動の検知	可能
越水による堤防の欠損の検知※	堤内地側、堤外地側	—	困難
越水による堤防の欠損量の検知※	堤内地側、堤外地側	—	困難

4-1-3 温度による検知可否

越水実験における温度での、水位の測定、越水の検知、越水による堤防欠損の検知の3項目の実験結果を表 32 に示す。

表 32 越水実験における温度による実験結果

観測対象	堤防の状態	気温との温度差 (°C)
水位の測定	水位 0m (貯水開始直後)	-1.23
	水位 1.3m (越水開始直前)	-1.02
越水の検知	越水前 (水位 0m~1.3m)	-1.02
	越水開始	-0.99
	越水範囲の拡大 (越水から 1 分経過)	-0.87
越水による 堤防の欠損	越水開始	-0.99
	堤防欠損 (越水から 1 分経過)	-0.87
	堤防欠損 (越水から 2 分経過)	-0.72
	堤防欠損 (FEP 管露呈 (露呈開始))	-0.63
	堤防欠損 (FEP 管露呈 (半分露呈))	-0.53
	堤防欠損 (FEP 管露呈 (全て露呈))	-0.64

水位の上昇、越水、越水による堤防の欠損と、水位が上昇し越水が進むにつれて気温との温度差が少なくなる傾向にある。水は熱伝導率が高いため、堤防と水と接水面積が大きくなることにより、堤防の土中の温度が外部温度に近くなると考える。従って、温度による越水の検知の可能性は高いと考えるが、水位、越水状態、堤防欠損と温度差の関係を本実験結果のみで定量的に定義することが困難である。従って、今回の実験結果では温度による水位の測定、越水の検知、越水による堤防の欠損の検知可否は、判断対象から除外する。

4-2. 河岸侵食検知の可否

4-2-1 振動強度による検知可否

河岸侵食実験における振動強度での、水位・流量の測定及び侵食による堤防の欠損の検知の2項目の実験結果を表 33 に示す。

表 33 河岸侵食実験における振動強度による実験結果

観測対象	堤防の状態	振動強度 (arb.)		
		一般部	橋台部	橋台・護岸部
水位・流量 の測定	流量 50L/s	786~1070	938~1487	655~897
	流量 300L/s	2051~2984	741~922	1486~1696
	流量 400L/s	3682~6813	1178~1659	1125~1322
侵食による 堤防の欠損 の検知	軽微の侵食	2225~2989	1178~1965	1125~1322
	部分崩落	5279~7564	4962~7690	4539~6474
	FEP 管露呈・浮上	6517~10406	7314~8928	13062~13690

水位・流量の測定について、流量が増加するにつれて振動強度が強まる傾向にある。ただし、流量増加とともに侵食が進むため、水位・流量と侵食のいずれによる影響であるかの切り分けが難しい。従って、振動強度による水位・流量の測定の可否は実験結果から除外する。

侵食による堤防の欠損の検知について、堤防の砂がさらさらと落下しながらの欠損や、10cm 四方程度の護岸タイルが1枚ごとに落下する軽微な欠損では1000~3000arb. 程度の振動強度である。こぶし大程度の砂の塊が落下する部分崩落では4500~8000arb. 程度の振動強度である。またFEP管が露呈し浮上する場合は6500~13700arb. 程度の振動強度である。一般河川の堤防の侵食では、拳程度以上の土塊の落下を伴うと考えられることから、4500~8000arb. の振動強度で侵食による堤防の欠損の検知、8000arb. 以上の振動強度で、FEP管理設位置以上の堤防の欠損の進行が検知可能と考える。

河岸侵食実験における振動強度での、水位・流量の測定可否、及び侵食による堤防欠損の検知可否の考察結果を表 34 に示す。

表 34 河岸侵食実験における振動強度による検知可否

検知対象	検知方法	検知可否
水位・流量の測定	—	—
侵食による堤防欠損の検知	4500~8000arb. の振動強度の検知	可能
侵食による堤防の欠損量の検知※	8000arb. 以上の振動強度の検知	可能

※FEP 管理設位置まで欠損したことを検知する

4-2-2 周波数による検知可否

河岸侵食実験における周波数特性での、水位・流量の測定及び侵食による堤防の欠損の検知の2項目の実験結果を表 35 に示す。

表 35 河岸侵食実験における周波数特性による実験結果

観測対象	堤防の状態	信号成分の強さが 15.0arb. 以上の周波数範囲 (Hz)		
		一般部	橋台部	橋台・護岸部
水位・流量 の測定	流量 50L/s	32	まれに 40	30~60
	流量 300L/s	30~35 まれに 10~700 超	20~40	20~60 まれに 10~700 超
	流量 400L/s	30~35 もしくは 10~700 超	20~40 まれに 10~700 超	20~60
侵食による 堤防の欠損 の検知	軽微の侵食	30~35 まれに 10~700 超	20~40 まれに 10~700 超	20~60
	軽微の侵食（堤防上 部欠損から 10 分後）	—	断続的に 10~700 超	—
	部分崩落	10~700 超	10~700 超	10~700 超
	FEP 管露呈・浮上	10~700 超	10~700 超	10~700 超

水位・流量の測定について、流量 50L/s の時点ではいずれの測定箇所も 30~60Hz 程度の低周波域の信号成分が強く、流量が増加するにつれて 10~700Hz 超の広い周波数範囲の信号成分が強くなる傾向にある。低周波域から高周波域への広い周波数範囲で様に信号成分が強くなる事象の特徴として、一般的に衝撃が発生する振動が考えられる。従って、流量が増加するにつれて 10~700Hz 超を検知しているが後述するように、侵食に伴う堤防の欠損による振動を検知していると考えられる。従って、水位・流量の測定は周波数特性では困難と考える。

侵食による堤防の欠損の検知について、堤防の砂がさらさらと落下しながらの欠損や、10cm 四方程度の護岸タイルが 1 枚ごとに落下する軽微な欠損では 30~60Hz 程度の周波数範囲を検知しており、欠損が進行していない場合との周波数範囲の差異が不明確であった。一方、こぶし大程度の砂の塊が落下する部分崩落及び FEP 管が露呈し浮上する場合には 10~700Hz 超程度の周波数範囲の振動を検知している。上述のようにこのような広く様な周波数範囲の振動は衝撃が発生する振動と考えられるため、土塊落下の振動もしくは、光ファイバ（FEP 管）に水流が当たる振動を検知していると考えられる。一般河川の堤防の侵食では、拳程度以上の土塊の落下を伴うと考えられることから、周波数特性による侵食の堤防欠損の検知は可能と考える。なお、堤防の欠損量の検知については、欠損量に応じた周波数範囲の差異がないことから検知は困難と考える。

河岸侵食実験における周波数特性での、水位・流量の測定可否、及び侵食による堤防欠損の検知可否の考察結果を表 36 に示す。

表 36 河岸侵食実験における周波数特性による検知可否

検知対象	検知方法	検知可否
水位・流量の測定	—	困難
侵食による堤防欠損の検知	10～700Hz 超の周波数範囲の振動の検知	可能
侵食による堤防の欠損量の検知	—	困難

4-3. 全体を通しての考察

表 37 に光ファイバセンサを用いた河川堤防の変状検知の検知対象と判定条件を示す。

光ファイバセンサを用いた河川堤防の変状検知では、振動測定装置を用いた振動強度と周波数特性の測定により、越水では①越水の検知、②越水による堤防の欠損の検知、③越水による堤防の欠損量の検知、浸食では①侵食による堤防欠損の検知、②侵食による堤防の欠損量の検知が可能と考える。

今回は考察対象箇所を絞ったが、振動測定装置の測定距離は 50km、測定解像度は 4m であることから、実際の河川においては 50km の区間全域において、4m の距離精度で、上記の越水及び浸食の検知が可能である。また、越水実験において堤内地側と堤外地側の光ファイバセンサいずれも同様の測定結果であったことから、

光ファイバの埋設位置について、一定程度の柔軟性があると考えられる。ただし、埋設位置は実際の河川では、より堤外地側と堤内地側の差が大きいと考えられるため、実際の河川において実験が必要と考える。

加えて、実際の河川においては歩行者や交通振動等の他の振動源も存在することから、判定条件に合致する振動が一定時間以上継続すること等の条件を含める必要があると考える。また、光ファイバセンサの埋設環境や河川状況、周辺環境等により、振動特性に差異が生じることも想定されるため、実際の河川の環境における判定条件の実験と、実験結果に基づく判定条件の調整が必要と考える。

表 37 光ファイバセンサを用いた河川堤防の変状検知の検知対象と判定条件

検知対象		検知の判定条件
越水	越水の検知	1200arb. 以上の振動強度かつ、 10～500Hz の周波数範囲の振動
	越水による堤防の欠損の検知	1700arb. 以上の振動強度かつ、 10～500Hz の周波数範囲の振動
	越水による堤防の欠損量の検知※	5000arb. 以上の振動強度かつ、 10～500Hz の周波数範囲の振動
侵食	侵食による堤防欠損の検知	4500～8000arb の振動強度かつ、 10～700Hz 超の周波数範囲の振動
	侵食による堤防の欠損量の検知※	8000arb. 以上の振動強度かつ、 10～700Hz 超の周波数範囲の振動

※光ファイバの埋設位置まで堤防が欠損したことを検知する

VII. 現場実装へ向けた考察

a) 実フィールドの環境ノイズの影響

今回の実験環境では振動の発生要因が水の流れと水の流れによる侵食のみであったが、実際のフィールド環境では光ファイバの敷設状況の違いや堤防の土壌の違いなどによって、判定条件における振動強度、周波数範囲が変わってくる。そのため環境に応じた調整が必要であり、設置環境毎のイニシャルデータ取得が運用開始前に必要となる。

また、堤防近辺を人・車などさまざまなものが通過することによって生じる振動、工場等の周辺設備からの振動のような環境ノイズも多いことが想定される。このような環境ノイズは、短期的・偶発的に越水や浸水と類似の振動特性を有する可能性がある。このような環境ノイズを除去するため、判定条件に振動強度、周波数範囲が一定時間以上継続することを条件に加える必要がある。

b) 既存光ファイバの有効活用に向けた、利用制度対象の拡大並びに、一部制限の緩和等

国土交通省では平成 14 年 6 月に政府において策定した「e-Japan 重点計画 2002」等を受け、収容空間等の整備、開放に加え、平成 14 年度から国の管理する河川・道路管理用光ファイバについて、施設管理に支障のない範囲内で電気通信事業者等に開放している。今回実証を行った光ファイバセンシング技術を用いた河川変状検知の社会実装に向けて、利用対象事業者の更なる拡大並びに、一部制限の緩和等が望まれる。

i) 光ファイバ利用制度対象の拡大

現在の対象事業者は、電気通信事業者、ケーブルテレビ事業者、国、地方公共団体に限定されているが、既存光ファイバの有効活用に向けて、更なる対象事業者の拡大が望まれる。

ii) 事務所及び出張所内等への光ファイバセンシング機器の設置許可

既存光ファイバの有効活用に向けて、事務所及び出張所内等への光ファイバセンシング機器の設置許可が望まれる。

iii) 使用上の制限の緩和

現在、光ファイバを道路〔河川〕管理用通信及び電気通信事業の用に供する以外の用途に使用してはならないが、既存光ファイバの有効活用に向けて、制限の見直しが望まれる。

c) 堤防の変状検知の具体的な閾値について

本実験環境で取得した値より算出した閾値の設定について、始めは設定値を低めに設定したいと考えている。理由としては、堤防の変状検知の取りこぼしが無いようするためであり、誤検知は増えると思われるが車や人の通行等のノイズ除去も含めて調整する事により精度向上を考えている。

d) 光ファイバの設置位置

既設ファイバを使用する場合は初めに定常状態の振動値を測定して閾値を算出する考えだが、新規にファイバを敷設する場合は堤防の深さ何 cm に敷設するかを決めておく事で定量的に振動値・閾値が定義できると考えている。

e) AI を活用した更なる精度向上

AI を活用した車や人の通行等のノイズ除去により精度向上を考えている。